

(19)

JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **10135576 A**

(43) Date of publication of application: **22.05.98**

(51) Int. Cl

**H01S 3/18**  
**H01L 33/00**

(21) Application number: **09038138**

(22) Date of filing: **21.02.97**

(30) Priority: **23.02.96 JP 08 35948**  
**02.08.96 JP 08204473**  
**06.09.96 JP 08236650**

(71) Applicant: **FUJITSU LTD**

(72) Inventor: **HORINO KAZUHIKO**  
**DOUMEN MEGUMI**

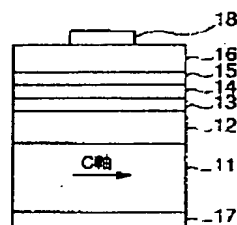
(54) **SEMICONDUCTOR LIGHT-EMITTING ELEMENT,  
OPTICAL SEMICONDUCTOR ELEMENT,  
LIGHT-EMITTING DIODE, AND DISPLAY**

(57) Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To reduce a threshold current density required for optical oscillation by forming an active layer with a specific property on a second semiconductor layer that is formed via a first semiconductor layer on a substrate main surface, forming a third semiconductor layer with a different property on it, and making the direction of the film thickness of the active layer different from the axis of one-axis anisotropy.

**SOLUTION:** A second semiconductor layer 13 is formed on the main surface of a substrate 11 directly or via a first semiconductor layer 12, and an active layer 14 whose energy band gap is smaller than the second semiconductor layer 13 and is made of a semiconductor with one-axis anisotropy is formed on the second semiconductor layer 13. Further, a third semiconductor layer 15 with a larger energy band gap than that of the active layer 14 is formed on the active layer 14. Then, a pair of electrodes 17 and 18 for causing current to flow in the direction of a film thickness are provided on the second semiconductor layer 13, the active layer 14, and the third semiconductor layer 15, where at least the direction of the film thickness of the active layer 14 is different from the axis of the one-axis anisotropy.

COPYRIGHT: (C)1998,JPO



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-135576

(43) 公開日 平成10年(1998) 5月22日

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>

識別記号

F I

H 0 1 S 3/18

H 0 1 S 3/18

H 0 1 L 33/00

H 0 1 L 33/00

C

審査請求 未請求 請求項の数30 O L (全 26 頁)

(21) 出願番号 特願平9-38138

(22) 出願日 平成9年(1997) 2月21日

(31) 優先権主張番号 特願平8-35948

(32) 優先日 平8(1996) 2月23日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(31) 優先権主張番号 特願平8-204473

(32) 優先日 平8(1996) 8月2日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(31) 優先権主張番号 特願平8-236650

(32) 優先日 平8(1996) 9月6日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号

(72) 発明者 堀野 和彦

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号 富士通株式会社内

(72) 発明者 堂免 恵

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号 富士通株式会社内

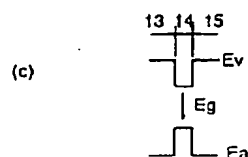
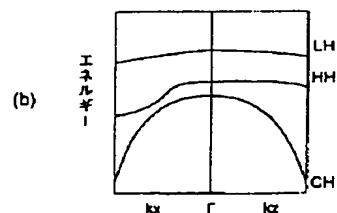
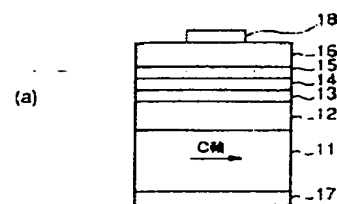
(74) 代理人 弁理士 岡本 啓三

(54) 【発明の名称】 半導体発光素子、光半導体素子、発光ダイオード及び表示装置

(57) 【要約】

【課題】 半導体発光素子に関し、レーザ発振に必要な閾値電流密度を低減し、クラッキングの発生し難い半導体層を有するとともに、面発光半導体レーザにおいては光の振動面を固定し且つ振動面の変動を抑制すること。

【解決手段】 基板11の主面上に直接又は第1の半導体層12を介して形成された第2の半導体層13と、前記第2の半導体層13の上に形成され、且つエネルギーバンドギャップが前記第2の半導体層13よりも小さく、一軸異方性を有する半導体よりなる活性層14と、前記活性層14上に形成されてエネルギーバンドギャップが前記活性層14よりも大きい第3の半導体層15と、前記第2の半導体層13、前記活性層14及び前記第3の半導体層15に膜厚方向に電流を流すための一対の電極17、18とを有し、少なくとも前記活性層14の膜厚方向は前記一軸異方性の軸とは異なる方向であること。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】基板の主面上に直接又は第1の半導体層を介して形成された第2の半導体層と、前記第2の半導体層の上に形成され、且つエネルギーバンドギャップが前記第2の半導体層よりも小さく、一軸異方性を有する半導体よりなる活性層と、前記活性層上に形成されてエネルギーバンドギャップが前記活性層よりも大きい第3の半導体層と、前記第2の半導体層、前記活性層及び前記第3の半導体層に膜厚方向に電流を流すための一対の電極とを有し、少なくとも前記活性層の膜厚方向は前記一軸異方性の軸とは異なる方向であることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項2】前記活性層を構成する前記半導体は、ウルツ型窒化物半導体であることを特徴とする請求項1記載の半導体発光素子。

【請求項3】前記ウルツ型窒化物は $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{N}$ であり、該組成比 $x$ は $0 \leq x \leq 1$ 、該組成比 $y$ は $0 \leq y \leq 1$ であって、該組成比 $x$ と該組成比 $y$ は $x-y$ 座標において、 $y=0.214x-0.328$ を示す直線と $y=0.353x-0.209$ を示す直線の間の範囲内に存在することを特徴とする請求項2記載の半導体発光素子。

【請求項4】前記基板は、GaN、AlN、SiCのいずれかからなり、前記主面は、 $\{11-20\}$ 面、または $\{1-100\}$ 面、または $\{11-20\}$ 面若しくは $\{1-100\}$ 面から $-5^\circ \sim +5^\circ$ の範囲内で傾いた面であることを特徴とする請求項1記載の半導体発光素子。

【請求項5】前記基板は $\text{LiAlO}_2$ 基板であり、前記主面は $\{100\}$ 面又は $\{100\}$ 面から $-5^\circ$ から $+5^\circ$ の角度でオフした面であることを特徴とする請求項1記載の半導体発光素子。

【請求項6】前記活性層は、一軸異方性結晶構造を有し、且つ、異方性を示す $c$ 軸に垂直でない面内で歪みが加わえられて $c$ 面内異方性を有することを特徴とする請求項1に記載の半導体発光素子。

【請求項7】前記活性層は、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{N}$ （但し、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）からなることを特徴とする請求項6に記載の半導体発光素子。

【請求項8】前記第2の半導体は $\text{Al}_u\text{Ga}_{1-u-v}\text{In}_v\text{N}$ （但し、 $0 \leq u \leq 1$ 、 $0 \leq v \leq 1$ ）からなり、且つ、前記第3の半導体は $\text{Al}_w\text{Ga}_{1-w-z}\text{In}_z\text{N}$ （但し、 $0 \leq w \leq 1$ 、 $0 \leq z \leq 1$ ）からなることを特徴とする請求項6に記載の半導体発光素子。

【請求項9】前記活性層の $a$ 軸の格子定数 $a_1$ と、前記第2の半導体層及び第3の半導体層の $a$ 軸の格子定数 $a_2$ 、 $a_3$ とが、 $a_1 < a_2$ 、 $a_1 < a_3$ の関係を満たすことを特徴とする請求項6に記載の半導体発光素子。

【請求項10】前記活性層の $c$ 軸の格子定数 $c_1$ と、前記第2の半導体層及び第3の半導体層の $c$ 軸の格子定数

$c_2$ 、 $c_3$ とが、 $c_1 < c_2$ 、及び、 $c_1 < c_3$ の関係を満たすことを特徴とする請求項6に記載の半導体発光素子。

【請求項11】前記活性層の $a$ 軸の格子定数 $a_1$ と、前記第2の半導体層及び第3の半導体層の $a$ 軸の格子定数 $a_2$ 、 $a_3$ とが、 $a_1 > a_2$ 、 $a_1 > a_3$ の関係を満たすことを特徴とする請求項6に記載の半導体発光素子。

【請求項12】前記活性層の $c$ 軸の格子定数 $c_1$ と、前記第2の半導体層及び第3の半導体層の $c$ 軸の格子定数 $c_2$ 、 $c_3$ とが、 $c_1 > c_2$ 、 $c_1 > c_3$ の関係を満たすことを特徴とする請求項6に記載の半導体発光素子。

【請求項13】前記基板の前記主面は、 $\{1-100\}$ 面または $\{11-20\}$ 面のいずれかに対してオフ角 $\theta$ （但し、 $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ ）だけオフした基板であることを特徴とする請求項6に記載の半導体発光素子。

【請求項14】前記基板、前記第2及び第3の半導体層及び前記活性層は、 $\{0001\}$ 面、 $\{1-100\}$ 面、又は、 $\{11-20\}$ 面のいずれかで劈開されていることを特徴とする請求項6記載の半導体発光素子。

【請求項15】前記基板の前記主面は、 $\{0001\}$ 面と交差する面方位を有する小面であり、該小面の上方に形成した前記活性層を発光部としたことを特徴とする請求項6に記載の半導体発光素子。

【請求項16】前記小面は、 $\{1-100\}$ 面又は $\{11-20\}$ 面又は $\{0001\}$ 面のいずれかに垂直な面方位に形成され、該 $\{1-100\}$ 面又は該 $\{11-20\}$ 面又は該 $\{0001\}$ 面は共振器の両端の劈開面であることを特徴とする請求項15記載の半導体発光素子。

【請求項17】前記第2の半導体層の下方又は第3の半導体層の上方にはミラー層が形成されており、該ミラー層を一端として前記活性層、前記第2及び第3の半導体層の膜厚方向に共振器が形成されていることを特徴とする請求項1記載の半導体発光素子。

【請求項18】前記共振器の共振波長は、フォトルミネッセンス光強度が最大となる波長であることを特徴とする請求項17記載の半導体発光素子。

【請求項19】前記活性層は、GaN又はInGaNの第1の層とAlGaInN又はGaN又はInGaNの第2の層の多層構造を有する多重量子井戸層、GaN単層、InGaN単層又はAlGaInN単層のいずれかからなることを特徴とする請求項17記載の光半導体素子。

【請求項20】前記基板の前記主面は、SiC基板の $\{11-20\}$ 面若しくは $\{1-100\}$ 面か、又は、サファイア基板の $\{1-102\}$ 面のいずれかであることを特徴とする請求項17記載の半導体発光素子。

【請求項21】 $\{11-20\}$ 面を主面とするSiC基板上に成長された第一導電型のAlGaNからなる第一の障壁層と、

該第一の障壁層上に堆積された、GaN 層若しくはInGaN 層を含む多重量子井戸層、GaN 層又はInGaN 層からなる活性層と、

該活性層上に堆積された第二導電型のAlGaIn 層からなる第二の障壁層と、

該第二の障壁層上に設けられた多層膜からなる反射鏡を第一の反射面とし、該第一の障壁層下に第二の反射面を有する膜厚方向の光共振器と、

第一及び第二の電極とを有することを特徴とする半導体発光素子。

【請求項22】 c軸が主面に平行である基板と、前記基板の上方に形成されてウルツ鉱構造結晶からなる第1の活性層と、該第1の活性層の下に形成された第1導電型不純物を含む第1の障壁層と、該第1の活性層の上に形成された第2導電型不純物を含む第2の障壁層と、該第1の活性層と第1及び第2の障壁層の膜厚方向に電流を流すための電極とを有する面発光半導体レーザと、

前記面発光半導体レーザから電氣的に分離されて前記基板の上方に形成されてウルツ鉱構造結晶からなる第2の活性層と、該第2の活性層の下に形成された第1導電型不純物を含む第1の半導体層と、該第2の活性層の上に形成された第2導電型不純物を含む第2の半導体層と、該第2の活性層と第1及び第2の半導体層の膜厚方向に流れる電流を外部に取出す電極とを有する受光素子とを有することを特徴とする光半導体装置。

【請求項23】 前記半導体レーザの前記第1の活性層と前記受光素子の前記第2の活性層は、GaN、InGaN、AlGaIn 又はAlGaInN からなることを特徴とする請求項22記載の光半導体装置。

【請求項24】 前記半導体レーザの前記第1及び第2の障壁層と前記受光素子の前記第1及び第2の半導体層は、GaN、InGaN、AlGaIn 又はAlGaInN からなることを特徴とする請求項22記載の光半導体装置。

【請求項25】 前記基板は、炭化シリコン、サファイアのいずれかから構成されていることを特徴とする請求項22記載の光半導体装置。

【請求項26】 前記基板は六方晶系構造を有し、前記主面は、{1-100}面又は{11-20}であることを特徴とする請求項22記載の光半導体装置。

【請求項27】 ウルツ鉱型化合物半導体結晶のc軸方向が、光の放出方向とほぼ直交していることを特徴とする発光ダイオード。

【請求項28】 前記ウルツ鉱型化合物半導体結晶のc軸方向と、結晶成長方向とがほぼ直交していることを特徴とする請求項27記載の発光ダイオード。

【請求項29】 前記ウルツ鉱型化合物半導体結晶が、II族の窒化物からなるIII-V族化合物半導体であることを特徴とする請求項27項に記載の発光ダイオード。

【請求項30】 光の放出方向がc軸方向とほぼ直交する

ウルツ鉱型化合物半導体結晶からなる複数の発光ダイオードを用い、前記複数の発光ダイオードのうち、偏光方向がある方向に偏光した右目用発光ダイオードと、前記右目用発光ダイオードの偏光方向に垂直な方向に偏光した左目用発光ダイオードとになるように配置し、立体表示を得るようにしたことを特徴とする表示装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は半導体発光素子、光半導体素子、発光ダイオード及び表示装置に関するものであり、より詳しくは、青色から紫外にかけた波長帯の光を発光するGaN等のウルツ鉱型化合物半導体を発光部に有する半導体発光素子、光半導体素子、発光ダイオード及び表示装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 近年、光ディスク用光源として、青色から紫外にかけての領域に波長を有する短波長レーザの開発が盛んである。青色レーザ用光源としては、II-VI族のZnSe系材料を使用した光素子と、III-V族のGaN系材料を使用した光素子がある。そのうち、半導体レーザの研究に関してはZnSe系材料が先んじていて、既に室温連続発振が得られるという報告がある。しかし、ZnSe系材料は本質的に劣化し易い材料であることから信頼性に問題があり、未だ実用化に至っていない。

【0003】 一方、数年前にGaNを使用した高輝度のLEDの発表されたことを境にして、耐環境性に優れるGaNが見直され、世界中で研究者の大きな増加を見ている。そして、1996年に日亜化学によってInGaNを用いてレーザ発振する半導体レーザが発表された。発光素子として用いられているGaN系半導体はウルツ鉱型化合物半導体であるため、類似の結晶構造を有する六方晶系のサファイア基板或いは6H-SiC基板上にMOVPE法（有機金属気相成長法）を用いてエピタキシャル成長させていた。ここで、6H-SiCのうち“H”は、6階回転対称を有する結晶であることを示し、また、“6”は、結晶が6相の原子又は分子の配列が周期的に形成された六相同期構造を有する結晶であることを示している。

【0004】 六方晶系のサファイア基板又は6H-SiC基板を用いる半導体レーザの形成は、次のような手順により形成される。サファイア基板を用いた場合には、例えば図24(a)に示すように、(0001)面を主面とするサファイア(0001)基板141上に、GaNバッファ層142を介して、n型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層143、n型GaN光ガイド層144、Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N活性層145、p型GaN光ガイド層146、及び、p型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層147をMOVPE法によってエピタキシャル成長させた後に、エッチングによりn型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層143の一部を露出させて、その露出面上にTi/Au電極148からなるn側電極を設ける

と共に、p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層147上にはNi/Au電極149からなるp側電極を設け、このような工程により半導体レーザが形成される。

【0005】一方、6H-SiC基板を用いる場合には、図24(b)に示すように、(0001) $s_i$ 面即ち、6H-SiC(0001)基板151のうちSi面の上に、n型 $\text{AlN}$ パッファ層152を介して、n型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層153、n型 $\text{GaN}$ 光ガイド層154、 $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 活性層155、p型 $\text{GaN}$ 光ガイド層156、及び、p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層157をMOVPE法によってエピタキシャル成長した後に、さらに、6H-SiC(0001)基板151裏面にTi/Au電極158からなるn側電極を設けると共に、p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層157上にはNi/Au電極159からなるp側電極を設ける工程を経て、これにより半導体レーザが形成される。

【0006】この様な従来の発光素子においては、 $\text{GaN}$ 系のエピタキシャル層142~147、152~157は、サファイア(0001)基板141或いは6H-SiC(0001)基板151の<0001>方向に(0001)面が成長することから、面内での歪みは等方的となり、 $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 活性層145、155は一軸異方性のままであった。その<0001>方向は、c軸方向である。

【0007】次に、 $\text{GaN}$ 系半導体のエネルギーバンド構造について説明する。図25(a)は、歪みがかからない状態の $\text{GaN}$ 系半導体の価電子帯のバンド構造を示す図であり、HH(Heavy Hole)とLH(Light Hole)のバンドがほぼ縮退しており、また、 $\text{GaN}$ 系半導体においてはCHバンドが近接している。上記図24(a)に示した従来の発光素子においては、n型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層143乃至p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層147の面内格子定数が、 $\text{GaN}$ パッファ層142の直上のn型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層143の格子定数で規定されるため、コヒーレントに成長したn型 $\text{GaN}$ 光ガイド層144乃至p型 $\text{GaN}$ 光ガイド層146は格子不整合及び熱膨張係数差による圧縮応力を受ける。

【0008】また、図24(b)に示した素子においても同様で、熱膨張係数差では引張応力を受けるが、 $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 活性層155に関しては格子定数による歪みの影響が強く、圧縮応力が働いている。以上のような半導体レーザの他に、本発明者等は、 $\text{GaN}$ の光学利得が従来材料に比べて非常に高いことを見出し、この材料が面発光レーザに適していることを確認している。

【0009】次に、面発光レーザについて説明する。基板上に形成された活性層の垂直方向に共振軸を有する光共振器(垂直共振器)を備え、活性層表面の垂直方向に光を出射する構造を有している。そのような面発光半導体レーザは、共振器長が短くて閾値電流が低いこと、半導体レーザ素子の2次元アレイを容易に実現できるこ

と、単位ウェーハ面積当たりの素子数が多いこと、或いはウェーハのまま素子の試験ができること等、特性上及び製造上の有用な性質を有しており、特に光ディスク用又は短距離光通信用として短波長光を発振する面発光レーザの開発が進められている。

【0010】しかし、従来材料の面発光レーザは、発振光の偏光面の方向が固定されないため、使用中に偏光面が変化し又は偏光面の変化に伴い発光出力特性にキックを生ずることがある。これでは、偏光を利用した光ディスクの読み出しができず、また光による書き込み・読み出しを安定して行うことができず、さらに安定した通信を実現することができない。

【0011】そこで、面発光半導体レーザの発振光の偏光面方位を固定し安定化することが必要とされている。従来の面発光半導体レーザの活性層は、閃亜鉛鉱型結晶の(001)面を主面とする基板上に堆積されていた。他方、 $\text{GaN}$ に代表される六方晶半導体を活性層とする面発光半導体レーザを同様の構造で構成する場合には、六方晶結晶のc軸に垂直な(0001)面を主面とする基板上に活性層を堆積することが予想される。以下、かかる構造を有する従来の面発光半導体レーザのについて説明する。

【0012】図26は、従来の面発光半導体レーザ斜視図であり、垂直共振器を有する面発光半導体レーザの基本構造を表している。図26に示すように、基板101は六方晶結晶、例えばサファイアからなり、c軸104に垂直な主面を有する。或いは、基板1は閃亜鉛鉱型結晶の(001)面を主面とする。かかる基板101上に第一導電型の障壁層107、活性層102及び第二導電型の障壁層108が順次エピタキシャルに堆積される。さらに、第二導電型の障壁層108上に円板形の多層膜からなる反射鏡103が形成される。この反射鏡103を一方の反射面とし、障壁層107の下面、即ち障壁層107と基板101との界面を他の反射面として、活性層102に平行な反射面と活性層102に垂直な共振軸とを有する光共振器が構成される。

【0013】ところで、現在実現されている閃亜鉛鉱型結晶の活性層を用いた面発光半導体レーザでは、反射鏡103を半導体の多層構造としかつ光共振器の両反射面に設けられる。これに対して、光学利得が大きい $\text{GaN}$ を活性層とする面発光半導体レーザは上記の反射鏡103を一方に備えることで発振可能であるとされる。また、発振光は、基板101の下面(主面の反対面)に形成された光学的窓から出射される。

【0014】上述した面発光半導体レーザの活性層102は基板101上にエピタキシャルに堆積される。従って、六方晶又は閃亜鉛鉱型結晶からなる活性層102は、六方晶のc軸又は閃亜鉛鉱型結晶の<001>軸が面に垂直な薄層として形成される。他方、共振器は活性層102に垂直な共振軸を有するから、発振光は活性層

102に垂直に進行し、活性層102面が偏光規定面となる。即ち、偏光規定面をxy面とし光の進行方向をz軸にとるとき、発振光は、偏光面がx軸を含むx偏光105及び偏光面がy軸を含むy偏光106から構成される。このz軸は、活性層2に垂直、即ち六方晶のc軸又は閃亜鉛鉱型結晶の<001>軸に平行であり、光学的異方性の回転対称軸をなすため、x偏光105とy偏光106とは結晶との光学的結合が等しい。このため、結晶学的にはx偏光105とy偏光106とのいずれも等しい強度で発振することができるので、発振光の偏光面は定まらず、偏光面は不安定になる。

【0015】かかる発振光の偏光面を安定化するため、反射鏡を楕円形又は長方形にすることで、x偏光105又はy偏光106の一方のみを発振させる半導体レーザが開発された。しかし、この半導体レーザは、出射光が円形ビームにならないという問題があり、また反射鏡の形状を精密に製造することが難しい。さらに、かかる不都合を解消すべく、活性層102又は障壁層107、108に面内屈折率分布を形成することでz軸廻りの屈折率の対称性を劣化させ、発振光の偏光面を規定する半導体レーザが提案された。しかし、屈折率分布を形成するための工程が必要で、製造工程が複雑になることは避けられない。

【0016】

【発明が解決しようとする課題】従来のGaN系の半導体の場合、価電子帯におけるエネルギー的に一番高いバンドHH、LHが二重に縮退しているため、このようなGaN系半導体ではHHとLHの双方のバンドに正孔が分布するので、このためレーザ発振をさせるための閾値電流密度が高くなるという問題があった。

【0017】また、6H-SiC基板上にGaN系半導体を成長させる際に、そのGaN系半導体層の(0001)面に熱膨張により生じた応力によってクラッキングが発生し易く、結晶性が良いものが得られにくい。なお、発光部を構成する上記Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N活性層145、155に(0001)面内で熱膨張係数差、格子不整合による圧縮応力がかかる場合には、図25(b)に示すように、無歪みの状態からさらにCHバンドのエネルギーがHH、LHに対して相対的に低いバンド構造となるだけで、価電子帯のエネルギー的に一番高いバンドHH、LHは二重に縮退したままである。

【0018】さらに、閾値電流密度が高くなるもう1つの原因として、サファイア基板に劈開性がないということが挙げられる。それらの問題の他に、従来の垂直共振器を有する面発光半導体レーザでは、活性層の面内異方性が小さいため発振光の偏光面が定まらず、出射光の偏光面を固定することができない、あるいは発振が安定しないということが挙げられる。

【0019】また、反射鏡を長方形にして偏光面を規定する構造では、出射光が円形ビームにならず、また微細

化するにつれて矩形状のパターンの形成が困難という問題がある。さらに、活性層又は障壁層に面内屈折率を形成する方法は、製造工程の簡素化に限界がある。ところで、発振光の偏光面が定まらないことは、面発光半導体レーザを光磁気ディスク装置の光源に用いる場合に別な問題が生じる。

【0020】即ち、光磁気ディスク装置では、光の偏光面の回転を検出することによってデータを読むためにレーザ光の偏光面が揃っていることが必要になる。しかし、従来の面発光レーザでは偏光面が揃っていないのでデータ読み出し素子として使用されていない。本発明は、光発振に必要な閾値電流密度を低減し、クラッキングの発生し難いGaN系半導体層を有するとともに、面発光半導体レーザにおいては光の偏光面を固定し且つ偏光面の変動を抑制できる半導体発光素子、光半導体素子、発光ダイオード及び表示装置を提供することを目的とする。

【0021】

【課題を解決するための手段】上記した課題は、図2又は図10に例示するように、基板11(41)の主面上に直接又は第1の半導体層12(52)を介して形成された第2の半導体層13(47)と、前記第2の半導体層13(47)の上に形成され、且つエネルギーバンドギャップが前記第2の半導体層13(47)よりも小さく、一軸異方性を有する半導体よりなる活性層14(42)と、前記活性層14(42)上に形成されてエネルギーバンドギャップが前記活性層14(42)よりも大きい第3の半導体層15(48)と、前記第2の半導体層13(47)、前記活性層14(42)及び前記第3の半導体層15(48)に膜厚方向に電流を流すための一対の電極17、18(10a、10b)とを有し、少なくとも前記活性層14(42)の膜厚方向は前記一軸異方性の軸とは異なる方向であることを特徴とする半導体発光素子によって解決する。

【0022】上記半導体発光素子において、図2に例示するように、前記活性層14(42)を構成する前記半導体は、ウルツ型窒化物半導体であることを特徴とする。前記ウルツ型窒化物はAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x-y</sub>In<sub>y</sub>Nであり、該組成比xは0≤x≤1、該組成比yは0≤y≤1であって、該組成比xと該組成比yはxy座標において、y=0.214x-0.328を示す直線とy=0.353x-0.209を示す直線の間の範囲内に存在することを特徴とする。

【0023】上記半導体発光素子において、前記基板11(41)は、GaN、AlN、SiCのいずれかからなり、前記主面は、{11-20}面、または{1-100}面、または{11-20}面若しくは{1-100}面から-5度～+5度の範囲内で傾いた面であることを特徴とする。上記半導体発光素子において、前記基板11(41)はLiAlO<sub>2</sub>基板であり、前記主面は{100}面

又は{100}面から-5度から+5度の角度でオフした面であることを特徴とする。

【0024】上記半導体発光素子において、前記活性層14(42)は、一軸異方性結晶構造を有し、且つ、異方性を示すc軸に垂直でない面内で歪みが加わえられてc面内歪異方性を有することを特徴とする特徴とする。また、前記活性層14(42)は、 $Al_x Ga_{1-x-y} In_y N$  (但し、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ) からなることを特徴とする。

【0025】上記半導体発光素子において、前記第2の半導体層13は $Al_u Ga_{1-u-v} In_v N$  (但し、 $0 \leq u \leq 1$ 、 $0 \leq v \leq 1$ ) からなり、且つ、前記第3の半導体層15は $Al_w Ga_{1-w-z} In_z N$  (但し、 $0 \leq w \leq 1$ 、 $0 \leq z \leq 1$ ) からなることを特徴とする。上記半導体発光素子において、前記活性層14(42)のa軸の格子定数 $a_1$ と、前記第2の半導体層及び第3の半導体層のa軸の格子定数 $a_2$ 、 $a_3$ とが、 $a_1 < a_2$ 、 $a_1 < a_3$ の関係を満たすことを特徴とする。また、前記活性層14(42)のc軸の格子定数 $c_1$ と、前記第2の半導体層及び第3の半導体層のc軸の格子定数 $c_2$ 、 $c_3$ とが、 $c_1 < c_2$ 、及び、 $c_1 < c_3$ の関係を満たすことを特徴とする。

【0026】上記半導体発光素子において、前記活性層14(42)のa軸の格子定数 $a_1$ と、前記第2の半導体層及び第3の半導体層のa軸の格子定数、 $a_2$ 、 $a_3$ とが、 $a_1 > a_2$ 、 $a_1 > a_3$ の関係を満たすことを特徴とする。また、前記活性層14(42)のc軸の格子定数 $c_1$ と、前記第2の半導体層及び第3の半導体層のc軸の格子定数 $c_2$ 、 $c_3$ とが、 $c_1 > c_2$ 、 $c_1 > c_3$ の関係を満たすことを特徴とする。

【0027】上記半導体発光素子において、前記基板11の前記主面は、{1-100}面または{11-20}面のいずれかに対してオフ角 $\theta$  (但し、 $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ ) だけオフした基板であることを特徴とする。または、前記基板11、前記第213及び第3の半導体層15及び前記活性層14は、{0001}面、{1-100}面、又は、{11-20}面のいずれかで劈開されていることを特徴とする。また、前記基板41の前記主面は、{0001}面と交差する面方位を有する小面であり、該小面の上方に形成した前記活性層を発光部としたことを特徴とする請求項7に記載の半導体発光素子。その小面は、{1-100}面又は{11-20}面又は{0001}面のいずれかに垂直な面方位に形成され、該{1-100}面又は該{11-20}面又は該{0001}面は共振器の両端の劈開面であることを特徴とする。

【0028】上記した半導体発光素子において、図17に例示するように、前記第2の半導体層42の下方又は第3の半導体層48の上方にはミラー層が形成され、該ミラー層を一端として前記活性層42、前記第2及び第

3の半導体層47、48の膜厚方向に共振器が形成されていることを特徴とする。この場合、前記共振器の共振波長は、フォトルミネッセンス光強度が最大となる波長であることを特徴とする。また、前記活性層42は、GaN又はInGaNの第1の層とAlGaInN又はGaN又はInGaNの第2の層の多層構造を有する多重量子井戸層、GaN単層、InGaN単層又はAlGaInN単層のいずれかからなることを特徴とする。さらに、前記基板41の前記主面は、SiC基板の(11-20)面若しくは(1-100)面か、又は、サファイア基板の(1-102)面のいずれかであることを特徴とする。

【0029】上記した課題は、(11-20)面を主面とするSiC基板41上に成長された第一導電型のAlGaInNからなる第一の障壁層47と、該第一の障壁層47上に堆積された、GaN層若しくはInGaN層を含む多重量子井戸層、GaN層又はInGaN層からなる活性層42と、該活性層42上に堆積された第二導電型のAlGaInNからなる第二の障壁層48と、該第二の障壁層48上に設けられた多層膜からなる反射鏡43を第一の反射面とし、該第一の障壁層47下に第二の反射面を有する膜厚方向の光共振器と、第一及び第二の電極50a、50bとを有することを特徴とする半導体発光素子に解決する。

【0030】また、上記した課題は、図18に例示するように、(11-20)面を主面とするc軸が主面に平行である基板53と、前記基板53の上方に形成されてウルツ鉱構造結晶からなる第1の活性層58と、該第1の活性層58の下に形成された第1導電型不純物を含む第1の障壁層56と、該第1の活性層58の上に形成された第2導電型不純物を含む第2の障壁層60と、該第1の活性層58と第1及び第2の障壁層56、60の膜厚方向に電流を流すための電極64、65とを有する面発光半導体レーザ66と、さらに、前記面発光半導体レーザ66から電氣的に分離されて前記基板53の上方に形成されてウルツ鉱構造結晶からなる第2の活性層58と、該第2の活性層58の下に形成された第1導電型不純物を含む第1の半導体層56と、該第2の活性層56の上に形成された第2導電型不純物を含む第2の半導体層58と、該第2の活性層58と第1及び第2の半導体層56、58の膜厚方向に流れる電流を外に取り出すための電極64、65とを有する受光素子67とを有することを特徴とする光半導体装置によって解決する。

【0031】この場合、前記半導体レーザ66の前記第1の活性層56と前記受光素子67の前記第2の活性層56は、GaN、InGaIn、AlGaIn又はAlGaInNからなることを特徴とする請求項23記載の光半導体装置。また、前記半導体レーザ66の前記第1及び第2の障壁層56、58と前記受光素子67の前記第1及び第2の半導体層56、58は、GaN、InGaIn、AlGaIn又はAlGaInNからなることを特徴とする。

【0032】また、前記基板53は、炭化シリコン、サ

ファイアのいずれかから構成されていることを特徴とする。さらに、前記基板 53 は六方晶系構造を有し、前記主面は、 $\{1-100\}$  面又は  $\{11-20\}$  であることを特徴とする。上記した課題は、図 19 に例示するように、ウルツ鉱型化合物半導体結晶の  $c$  軸方向が、光の放出方向とほぼ直交していることを特徴とする発光ダイオード 70 によって達成する。

【0033】また、上記ウルツ鉱型化合物半導体結晶の  $c$  軸方向と、結晶成長方向とがほぼ直交していることを特徴とする。また、上記ウルツ鉱型化合物半導体結晶が、III 族の窒化物からなる III-V 族化合物半導体であることを特徴とする。さらに、図 23 に例示するように、光の放出方向が  $c$  軸方向とほぼ直交するウルツ鉱型化合物半導体結晶からなる複数の発光ダイオード 98、99 を用い、前記複数の発光ダイオード 98、99 のうち、偏光方向がある方向に偏光した右目用発光ダイオード 98 と、前記右目用発光ダイオードの偏光方向に垂直な方向に偏光した左目用発光ダイオード 99 とになるように配置し、立体表示を得るようにしたことを特徴とする表示装置。

【0034】次に、上記した発明の作用を説明する。本発明では、基板の主面を選ぶことによって、その基板の上に形成される六方晶型又はウルツ鉱型の半導体層の  $c$  軸がその半導体層の面に対して垂直でなくなるようにしている。したがって、その基板の上に形成される六方晶型又はウルツ鉱型の活性層に、面方向の圧縮歪又は引張歪をかけると、その活性層は 3 軸異方性を持つようになる。この結果、活性層の価電子帯での縮退が解け、そのような活性層を有する半導体レーザの発振の閾値電流が低下する。

【0035】このような構造によれば、化合物半導体層による発光の偏光面（光学的異方性）が一義的に決定できる。また、基板の上にそのような活性層などを成長して面発光半導体レーザを形成すると、活性層の面内異方性が大きくなって電場ベクトルが一方向に定められるため、偏光が決定できる。

【0036】このように、面発光半導体レーザの発振光の偏光面が一義的に定まると、光磁気ディスク装置の光源としての使用が可能になるとともに、面発光半導体レーザと同一基板に受光素子を製造することが容易になる。これにより、従来行っていた半導体レーザと受光素子の取付け作業が不要になるとともに、受光装置の小型化がさらに進むことになる。

【0037】なお、基板としては、GaN のようなウルツ鉱型構造、 $\text{LiAlO}_2$  のような四方晶、サファイア、 $6\text{H-SiC}$  のような六方晶の結晶を用いる。また、その基板の主面として、 $\{1-100\}$  面、又は  $\{11-20\}$  面を使用する。ところで、発光ダイオードを構成するウルツ鉱型化合物半導体結晶の  $c$  軸方向が、光の放出方向とほぼ直交するようにすると、偏光方向が定まる。そこ

で、そのような発光ダイオードを表示装置の表示面に複数個配置し、1つの発光ダイオードによって画素の一部又は全部を構成するようにするとともに、隣接する発光ダイオードの偏光方向を互いに  $90^\circ$  相違させる。これにより、右目偏光方向用の発光ダイオードと左目偏光用の発光ダイオードを隣接することができ、立体表示装置で偏向子を省略して部品点数を減らし、製造コストを低減できる。しかも、そのような表示装置は画像が明るくなる。

# 10 【0038】

【発明の実施の形態】そこで、以下に本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。

（第 1 実施形態）図 1 (a) 及び (b) は、本発明の第一実施形態の構成図である。図 1 (a) 及び (b) に示す半導体レーザにおいて、一軸異方性結晶構造を有する第一の半導体層 1 を発光部とし、この第一の半導体層 1 の異方性を示す軸に垂直でない面内で歪みを加えて 3 軸異方性を持たせている。

【0039】このように、異方性を示す軸（即ち、 $c$  軸）に対して垂直とならない面内で歪みを加えると、加わる歪みは各方位において等方的において三軸異方性を示すことになる。この結果、価電子帯における HH と LH の縮退が解け、レーザ発振のための閾値電流密度が低減する。即ち、図 1 (b) に示すように、エネルギー的に最上位にあった HH と LH のバンドの縮退が解け、LH と HH と CH (crystalline field split hole) の各バンドの相互間にエネルギー差が生じるので、レーザ発振のためには HH にのみキャリアを遷移させればよく、閾値電流密度が大きくなる。このとき、トップバンドの分極で決定される電場ベクトルの向きに垂直に共振器を作製する。

【0040】これに対して、従来技術で説明したように、 $c$  軸に垂直な GaInN 層の  $(0001)$  面内で圧縮応力がかかった活性層を有する半導体レーザでは、レーザ発振させるために、HH、LH の 2 つのバンドの双方をキャリアで満たす必要があり、閾値電流密度が高くなる。図 1 (a) において、第一の半導体層 1 とは異なる格子定数を有する第二及び第三の半導体 2、3 によって第一の半導体層 1 が挟まれ、しかも、それらの層の界面が第一の半導体層 1 の異方性を示す軸に垂直でないようにする。

【0041】この様に、第一の半導体層 1 よりなる発光部の主面を  $c$  軸に垂直でない面で構成し、この第一の半導体層 1 とは格子定数の異なる第二の半導体 2 及び第三の半導体層 3 で第一の半導体層 1 を挟むと、それらの格子定数の差に基づいて、 $c$  軸に垂直でない面内に歪み加わり、発光部に三軸異方性を持たせることができる。次に、第 1～第 3 の半導体層 1、2、3 についての材料、結晶格子定数について説明する。

【0042】上記した第一の半導体層 1 を構成する材料



として、例えば $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{N}$  (但し、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ )を用いる。そのようなウルツ鉱型の窒化物半導体は、一軸異方性を有する発光素子用半導体材料として最も典型的且つ有用なものである。また、第二の半導体層2を構成する材料として $\text{Al}_u\text{Ga}_{1-u-v}\text{In}_v\text{N}$  (但し、 $0 \leq u \leq 1$ 、 $0 \leq v \leq 1$ )を採用し、且つ、第三の半導体層3を構成する材料として $\text{Al}_w\text{Ga}_{1-w-z}\text{In}_z\text{N}$  (但し、 $0 \leq w \leq 1$ 、 $0 \leq z \leq 1$ )を採用する。第二の半導体層2及び第三の半導体層3として、同じGaIn系材料からなる第一の半導体層1とは混晶比の異なるGaIn系半導体を用いることによって、結晶性を損なうことなく第一の半導体層1に対して応力を加えることができる。第二の半導体層2と第三の半導体層3の混晶比は同じであっても良い。

【0043】さらに、第一の半導体層1のa軸の格子定数 $a_1$ と、第二の半導体層2及び第三の半導体層3のa軸の格子定数 $a_2$ 、 $a_3$ とが、 $a_1 < a_2$ 、 $a_1 < a_3$ の関係を満たすようにする。加えて、第一の半導体層1のc軸の格子定数 $c_1$ と、第二の半導体層2及び第三の半導体層3のc軸の格子定数 $c_2$ 、 $c_3$ とが、 $c_1 < c_2$ 、 $c_1 < c_3$ の関係を満たすようにする。

【0044】このような格子定数の関係にすると、第一の半導体層1に面内二軸性引張応力を加えることができ、それによってバンドの縮退を解いて閾値電流密度を低減することができる。この場合には、圧縮応力に比べて価電子帯のエネルギー的に一番高いバンドと二番目のバンドとのエネルギー差が大きくなり(図14参照)、且つトップバンドがLHとなるため、閾値電流密度がさらに低減する。

【0045】これに対して、第一の半導体層1のa軸の格子定数 $a_1$ と、第二の半導体層2及び第三の半導体層3のa軸格子定数 $a_2$ 、 $a_3$ とが、 $a_1 > a_2$ 、 $a_1 > a_3$ の関係を満たすようにする。かつ、第一の半導体層1のc軸の格子定数 $c_1$ と、第二の半導体層2及び第三の半導体層3のc軸の格子定数 $c_2$ 、 $c_3$ とが、 $c_1 > c_2$ 、 $c_1 > c_3$ の関係を満たすようにする。

【0046】このような格子定数の関係にすると、第一の半導体層1の面内に圧縮応力(歪)を加えることができ、それによってHH、LHバンドの縮退を解いて閾値電流密度を低減することができるのと同時に、引張応力になる場合に比べてクラックの発生の心配がなくなるので、信頼性がより高められる。また、第二の半導体層2及び第三の半導体層3のエネルギーバンドギャップが、第一の半導体層1のエネルギーギャップよりも大きいような材料と膜厚を選択する。このようなエネルギーバンドギャップの関係を設定することによって、光及びキャリアを第一の半導体層1に閉じ込められ、効率よい発光が得られる。

【0047】また、半導体レーザを構成する基板の構成材料として、GaIn、AlIn、或いは、SiCのいずれかから

形成されたものを選択する。半導体レーザを構成する半導体基板として、一軸異方性結晶構造のGaIn、AlIn、或いは、SiCのいずれかからなる基板を用いた場合、その主面を適当に選択することによって、基板上に成長した第一の半導体層1に歪みを加えたときに第一の半導体層1に三軸異方性をもたせることができる。

【0048】半導体レーザを構成する基板上に最初に設けた半導体層を、基板と同じ組成にする。例えばGaIn系の混晶基板を用い、同じ組成のクラッド層を基板上に直接設ける。これによって、クラッド層上で発光部を構成する第一の半導体層1に対して効果的に歪みを加えることができる。次に、上記した基板の面方位について説明する。

【0049】半導体レーザを構成する半導体基板の主面を、 $\{1-100\}$ 面または $\{11-20\}$ 面のいずれかからオフ角 $\theta$  (但し、 $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ )だけオフさせた面に形成する。なお、本明細書においては、通常“1バー”或いは“2バー”で表される指数を便宜的に、“-1”或いは“-2”等で表記する。半導体レーザを構成する基板として一軸異方性結晶構造を有する半導体を用いた場合、その主面を $\{1-100\}$ 面又は $\{11-20\}$ 面にすることによって、基板上方の第一の半導体層1に歪みを加えて三軸異方性をもたせることができる。この場合、図1(c)に示すように、双晶等の発生を抑制するためにオフ角 $\theta$  (但し、 $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ )だけ主面をオフしても良い。

【0050】また、半導体レーザの共振器を構成する劈開面を、 $\{0001\}$ 面、 $\{1-100\}$ 面、及び、 $\{11-20\}$ 面のいずれかにする。基板の主面として $\{1-100\}$ 面を用いた場合には、 $\{0001\}$ 面、 $\{11-20\}$ 面のいずれかが基板の主面に対して垂直な劈開面となる。また、基板の主面として $\{11-20\}$ 面を用いた場合には、 $\{0001\}$ 面、 $\{1-100\}$ 面のいずれかが基板の主面に対して垂直な劈開面となる。この場合、第一の半導体層1の2つの劈開面によって共振器が構成される。

【0051】さらに、半導体レーザを構成する半導体基板の主面を $\{0001\}$ 面とすると共に、その基板の表面に $\{0001\}$ 面以外の小面を設け、この小面上に設けた第一の半導体層1を発光部(活性層)とした。その小面は、半導体基板の $\{0001\}$ 面に対して傾斜する面をも含む概念である。このように、三軸異方性を持たせるための $\{0001\}$ 面以外の小面を、基板の一部に設けても良いものであり、その小面によって、例えばTS (Terraced Substrate) 型半導体レーザ等の一部を構成できる。

【0052】小面を、 $\{1-100\}$ 面、或いは $\{11-20\}$ 面のいずれかと垂直な面とし、この垂直な面を共振器を構成する劈開面としてもよい。この場合にも、小面に垂直な $\{1-100\}$ 面又は $\{11-20\}$ 面を

劈開面とすることによって、2つの劈開面によって共振器を構成することができる。次に、上記した光半導体装置の構造とその製造方法を具体的に説明する。

### 【0053】第1例

まず、図2(a)に示すように、(1-100)面を主面とするn型Ga<sub>0.9</sub>N (1-100)基板11上に、TMGa (トリメチルガリウム)を10~100μmol/分、例えば、45μmol/分、TMA1 (トリメチルアルミニウム)を10~100μmol/分、例えば、45μmol/分、アンモニア (NH<sub>3</sub>)を0.02~0.2mol/分、例えば、0.1mol/分、Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>を0.0001~0.002μmol/分、例えば、0.0007μmol/分、及び、キャリアガスとしての水素を300~3000sccm、例えば、1000sccm流し、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を850~1100℃、例えば、950℃とした状態で、100~5000nm、好適には2000nmのn型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N クラッド層12を成長させる。

【0054】引き続いて、TMGaを10~100μmol/分、例えば、45μmol/分、アンモニアを0.02~0.2mol/分、例えば、0.1mol/分、Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>を0.0001~0.002μmol/分、例えば、0.0007μmol/分、及び、キャリアガスとしての水素を300~3000sccm、例えば、1000sccmを流し、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1050℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ50~500nm、好適には100nmのn型Ga<sub>0.9</sub>N 光ガイド層13を成長させる。

【0055】引き続いて、TMGaを2.5~25μmol/分、例えば、10μmol/分、TMIn (トリメチルインジウム)を25~250μmol/分、例えば、100μmol/分、アンモニアを0.02~0.2mol/分、例えば、0.1mol/分、及び、キャリアガスとしての窒素を300~3000sccm、例えば、1000sccmを流し、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550~800℃、例えば、650℃とした状態で、厚さ1~20nm、好適には3nmのGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N 活性層14を成長させる。

【0056】引き続いて、TMGaを10~100μmol/分、例えば、45μmol/分、アンモニアを0.02~0.2mol/分、例えば、0.1mol/分、ビスシクロペンタジエニルマグネシウムを0.01~0.5μmol/分、例えば、0.05μmol/分、及び、キャリアガスとしての水素を300~3000sccm、例えば、1000sccmを流し、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1050℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ50~500nm、好適には100nmのp型Ga<sub>0.9</sub>N 光ガイド層15を成長させる。

【0057】引き続いて、TMGaを10~100μmol

/分、例えば、45μmol/分、TMA1を10~100μmol/分、例えば、45μmol/分、アンモニアを0.02~0.2mol/分、例えば、0.1mol/分、ビスシクロペンタジエニルマグネシウムを0.01~0.5μmol/分、例えば、0.05μmol/分、及び、キャリアガスとしての水素を300~3000sccm、例えば、1000sccm流し、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を850~1100℃、例えば、950℃とした状態で、100~2000nm、好適には500nmのp型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N クラッド層16を成長させる。

【0058】なお、この場合のAl<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N クラッド層12、16の成長速度は0.6~5.5μm/時、典型的には2.6μm/時であり、また、Ga<sub>0.9</sub>N 光ガイド層13、15の成長速度は0.5~5.2μm/時、典型的には2.4μm/時であり、さらに、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N 活性層14の成長速度は0.1~1.5μm/時、典型的には0.6μm/時である。

【0059】次いで、n型Ga<sub>0.9</sub>N (1-100)基板11の裏面にn側電極としてのTi/Au電極17を設け、一方、p型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N クラッド層16上にはp側電極としてNi/Au電極18を設け、適当に素子分離したのち、(0001)面で劈開して共振器を形成して半導体レーザが完成する。この場合、(0001)面は基板の主面である(1-100)面に対して垂直であるので、一対の劈開面が共振器として作用することになる。

【0060】この第一の例においては、基板として(1-100)面を用いているので、その上に成長するn型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N クラッド層12乃至p型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N クラッド層16の成長面も(1-100)面となり、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N活性層14はn型Ga<sub>0.9</sub>N 光ガイド層13との格子定数の差により、(1-100)面内において圧縮応力を受けるため、3軸異方性となる。

【0061】即ち、第一の例における面内の原子間隔は、n型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N クラッド層12のa軸及びc軸の格子定数3.189Å及び5.185Åで規定されるため、a軸及びc軸の格子定数が3.225Å及び5.243ÅであるGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N 活性層14には圧縮応力が加わり、3軸異方性となる。なお、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N、Ga<sub>0.9</sub>N、及び、Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N のエネルギーバンドギャップは、それぞれ3.15eV、3.4eV、及び3.7eVである。

【0062】この様なGa<sub>0.9</sub>N 系半導体に面内圧縮応力が印加された場合、図2(b)に示すように、エネルギー的に最上位にあり縮退していたHHとLHのバンドの縮退がとけて分離し、LHが最上位になり、このLHと伝導帯との間の遷移によってレーザ発振が行われることになり、閾値電流密度が大きく低減する。この第一の例においては、基板として(1-100)面を主面とするGa<sub>0.9</sub>N (1-100)基板11を用いているが、(11-20)面を主面とするGa<sub>0.9</sub>N 基板を用いても良く、更に、

(1-100)面、或いは(11-20)面を主面とするAlN基板或いはSiC基板を用いても良く、且つ、この主面については(1-100)面或いは(11-20)面と結晶学的に等価な全ての面を含むものであり、本実施形態の以下の例等においても同様である。

【0063】なお、半導体レーザの活性層、クラッド層が形成される基板として、GaN以外にAlN、SiCその他の基板を用いてもよい。例えば、図2(a)に示した素子構造におけるGaN基板をAlN基板に置き換え、その上に図2(a)と同じ構造を設ければ良く、また、SiC基板を用いる場合には、n型SiC基板上に厚さ5~100nm、例えば、20nmのn型AlNバッファ層を介してその上に図2(a)と同じ構造を設ければ良い。

【0064】なお、図3に示すように、AlN基板11aの抵抗が高いと思われる場合には、AlGaNクラッド層12の一部に電極17aを接続した構造を採用する。AlNバッファ層を使用する場合にも同様である。これらは、以下の例でも同様に採用してもよい。なお、本実施形態及び以下の実施形態では、図2(c)に示すように、活性層のエネルギーバンドギャップは、クラッド層、後述するガイド層、後述する光閉じ込め層のエネルギーバンドギャップよりも小さい。

#### 【0065】第2例

次に、図4を参照して本実施形態の第2例を説明する。まず、図4(a)に示すように、(1-100)面を主面とするn型GaN(1-100)基板21上に、TMGaを2.5~25μmol/分、例えば、10μmol/分、TMAlを30~300μmol/分、例えば、150μmol/分、TMInを250~2500μmol/分、例えば、1000μmol/分、アンモニアを0.02~0.2mol/分、例えば、0.1mol/分、Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>を0.0001~0.002μmol/分、例えば、0.0007μmol/分、及び、キャリアガスとしての窒素を300~3000sccm、例えば、1000sccm流し、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550~900℃、例えば、700℃とした状態で、100~5000nm、好適には2000nmのn型Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>In<sub>0.3</sub>Nクラッド層22を成長させる。

【0066】引き続き、TMGaを5~50μmol/分、例えば、20μmol/分、TMAlを10~100μmol/分、例えば、50μmol/分、TMInを150~1500μmol/分、例えば、660μmol/分、アンモニアを0.02~0.2mol/分、例えば、0.1mol/分、Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>を0.0001~0.002μmol/分、例えば、0.0007μmol/分、及び、キャリアガスとしての窒素を300~3000sccm、例えば、1000sccmを流し、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550~900℃、例えば、700℃とした状態で、厚さ50~500nm、好適には100nmのn型Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>In<sub>0.3</sub>N光ガイド層2

3を成長させる。

【0067】引き続き、TMGaを2.5~25μmol/分、例えば、10μmol/分、TMInを25~250μmol/分、例えば、100μmol/分、アンモニアを0.02~0.2mol/分、例えば、0.1mol/分、及び、キャリアガスとしての窒素を300~3000sccm、例えば、1000sccmを流し、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550~900℃、例えば、700℃とした状態で、厚さ1~20nm、好適には3nmのGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N活性層24を成長させる。

【0068】引き続き、TMGaを5~50μmol/分、例えば、20μmol/分、TMAlを10~100μmol/分、例えば、50μmol/分、TMInを150~1500μmol/分、例えば、660μmol/分、アンモニアを0.02~0.2mol/分、例えば、0.1mol/分、ビスシクロペンタジエニルマグネシウムを0.01~0.5μmol/分、例えば、0.05μmol/分、及び、キャリアガスとしての窒素を300~3000sccm、例えば、1000sccmを流し、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550~900℃、例えば、700℃とした状態で、厚さ50~500nm、好適には100nmのp型Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>In<sub>0.3</sub>N光ガイド層25を成長させる。

【0069】引き続き、TMGaを2.5~25μmol/分、例えば、10μmol/分、TMAlを30~300μmol/分、例えば、150μmol/分、TMInを250~2500μmol/分、例えば、1000μmol/分、アンモニアを0.02~0.2mol/分、例えば、0.1mol/分、ビスシクロペンタジエニルマグネシウムを0.01~0.5μmol/分、例えば、0.05μmol/分、及び、キャリアガスとしての窒素を300~3000sccm、例えば、1000sccm流し、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550~900℃、例えば、700℃とした状態で、100~2000nm、好適には500nmのp型Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>In<sub>0.3</sub>Nクラッド層26を成長させる。

【0070】なお、この場合のAl<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>In<sub>0.3</sub>Nクラッド層22、26の成長速度は0.2~3.0μm/時、典型的には1.2μm/時であり、また、Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>In<sub>0.3</sub>N光ガイド層23、25の成長速度は0.3~5.0μm/時、典型的には1.8μm/時であり、さらに、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N活性層14の成長速度は0.1~1.5μm/時、典型的には0.6μm/時である。

【0071】次いで、表面が(1-100)面のn型GaN基板21の裏面にn側電極としてTi/Au電極27を設け、一方、p型Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>In<sub>0.3</sub>Nクラッド層26上にはp側電極としてNi/Au電極28を設け、適当に素子分離したのち、(0001)面で劈開して共振器を形成して半導体レーザが完成する。この第二の例においては、

基板として(1-100)面を用いているので、その上に成長するn型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ クラッド層22乃至p型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ クラッド層26の成長面も(1-100)面となり、 $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 活性層24は引張応力を受けるため、3軸異方性となる。

【0072】即ち、第二の例における面内の原子間隔は、n型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ クラッド層22のa軸及びc軸の格子定数、3.266Å及び5.276Åで規定されるため、a軸及びc軸の格子定数が3.225Å及び5.243Åである $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 活性層24には引張応力がかかり、3軸異方性となる。なお、 $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.2}\text{N}$ 、及び、 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ のエネルギーバンドギャップは、それぞれ3.15eV、3.4eV及び3.6eVである。

【0073】このように、GaN系半導体に面内引張応力が印加された場合、図4(b)に示すように、エネルギー的に最上位にあり縮退していたHHとLHのバンドの縮退が解けて分離し、HHが最上位になると共に、LHとHHとのエネルギー差をより大きくとることができるので、閾値電流密度をさらに低減することができる。このように、閾値電流密度の低減に関しては、成長面内の二軸性圧縮応力による図2(b)の価電子帯のバンド構造より、面内の二軸性引張応力による図4(b)の価電子帯のバンド構造の方が1番上と2番目のバンド間のエネルギー差を大きく取ることができるので望ましいが、引張応力の場合には、活性層にクラックが発生する可能性が高くなるので、素子寿命の観点からは圧縮応力の方が望ましいことになる。

【0074】なお、この第二の例においても、AlN基板を用いる場合には、図4(a)に示した素子構造におけるGaN基板をAlN基板に置き換え、その上に図4(a)と同じ構造を設ければ良く、また、SiC基板を用いる場合には、n型SiC基板上に厚さ5~100nm、例えば、20nmのAlNバッファ層を介してその上に図4(a)と同じ構造を設ければ良い。

### 【0075】第3例

次に、図5を参照して、本実施形態の第3の例について説明するが、製造条件は第1例と全く同じであるので、構造について説明する。図5に斜視図を示す素子は所謂TS型半導体レーザであり、基板として(0001)面を主面とするGaN基板の段差部に(11-21)面からなる(11-21)小面32を設けたn型GaN(0001)基板31を用いたものである。このn型GaN(0001)基板31の上に、第一の例と全く同様にn型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層12、n型GaN光ガイド層13、 $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 活性層14、p型GaN光ガイド層15、及び、p型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層16を順次成長させる。

【0076】次いで、Ti/Au電極17、及び、 $\text{SiO}_2$ 等の絶縁膜33に設けた開口を介してNi/Au電極18を設け

て適当に素子分離したのち、(1-100)面で劈開することにより、一對の(1-100)劈開面34を共振器とするTS型半導体レーザが完成する。この場合、基板の主面は(0001)面でc軸に垂直な面であるが、実際に発光部、即ち、レーザ発振部となるのは(11-21)面に平行な面であり、この(11-21)面内において圧縮応力が印加され3軸異方性となり、図2(b)のように縮退が解けるので閾値電流密度が低下するが、応力に加わるのが(11-21)小面32であるので、第一の例に比べて応力の影響が小さくなり、閾値電流密度低減の効果は劣ることになる。

【0077】なお、この場合の小面は(11-21)小面32に限られるものでない。また、この第3の例においても、基板はGaN、 $\text{LiAlO}_2$ に限られるものでなく、AlN或いはSiCを用いても良く、基板の材料を変えることに伴う構成の変更は第一の例における置き換えの場合と同ようであり、且つ、第二の例と同ような組成の半導体を用いた場合には、第二の例と同様に、活性層には引張応力がかかることになる。

### 【0078】第4例

上記の第1~第3の例においては基板として2元化合物基板を用いて説明しているが、 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 或いは $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ 等の混晶基板を用いても良い。その場合には、その上に形成される $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層又は $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ クラッド層との格子整合が完全に取れるので、成長層の結晶性を損なうことがない。

【0079】その他の半導体レーザの形成に用いる基板としては、図6(a)に示すように、正方晶を有する $\text{LiAlO}_2$ 基板35を使用してもよく、その例を以下に説明する。なお、 $\text{LiAlO}_2$ は、リチウムアルミネートと呼ばれる。そこで次に、 $\text{LiAlO}_2$ 基板35を用いて半導体レーザを形成する工程について説明する。

【0080】 $\text{LiAlO}_2$ 基板35の主面は、{100}面又は{100}面から所定の角度、例えば±5度の範囲内でオフしたものをを用いる。まず、イソプロピルアルコール、エチルアルコールのような有機洗浄剤を用いて $\text{LiAlO}_2$ 基板35の表面を洗浄する。次に、有機金属気相成長装置(不図示)の成長炉内のサセプタ上に $\text{LiAlO}_2$ 基板35を載置する。その後、 $\text{LiAlO}_2$ 基板35の周囲の雰囲気窒素を窒素で置換しながら、その雰囲気圧力を100 Torrまでに減圧する。

【0081】続いて、後述する成長温度よりも50度高い温度で $\text{LiAlO}_2$ 基板35を加熱し、これにより $\text{LiAlO}_2$ 基板35表面の元素を昇華させてサーマルクリーニングを行う。その後、 $\text{LiAlO}_2$ 基板35を例えば800~1050℃の成長温度まで下げ、ついで、成長雰囲気中TMGaガス、アンモニアガス、 $\text{Si}_2\text{H}_6$ ガスを導入する。TMGaは、恒温槽において窒素ガスを用いてバブリングしてガス状にされたものであり、その窒素ガスはキャリアガスとして用いられている。また、 $\text{Si}_2\text{H}_6$ のうちのSi元素

はn型のドーパントとして機能する。

【0082】TMGaガスの流量は、 $10 \sim 100 \mu\text{mol}/\text{min}$ の範囲内に設定する。また、アンモニアガスの流量は $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5 \mu\text{mol}/\text{min}$ の範囲内とする。さらに、窒素ガスは、 $0.3 \sim 3.0 \mu\text{mol}/\text{min}$ の範囲内に設定する。この場合、TMGaガスの流量を $45 \mu\text{mol}/\text{min}$ 、アンモニアガスの流量を $1 \times 10^5 \mu\text{mol}/\text{min}$ 、窒素ガスの流量を $1.0 \mu\text{mol}/\text{min}$ に設定して、さらに、成長温度を $930^\circ\text{C}$ に設定すると、LiAlO<sub>2</sub>基板上のGaNの成長速度は $2.4 \mu\text{m}/\text{h}$ となる。なお、上記したガス流量、成長温度の範囲内での条件によれば、GaNの成長速度は、 $0.5 \sim 5.2 \mu\text{m}/\text{h}$ となる。

【0083】そのような条件によってLiAlO<sub>2</sub>基板35の上に、膜厚が例えば $5 \sim 100 \text{nm}$ のn型のGaNバッファ層36を成長する。続いて、第1例と同ような条件でn型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層12、GaN光ガイド層13、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N活性層14、p型GaN光ガイド層15、p型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層16を順に形成する。なお、p型のドーパントとして、マグネシウム(Mg)を用いる。

【0084】それらの層の形成条件、膜厚、原料ガスは、第1例と同じにする。次に、LiAlO<sub>2</sub>基板35を成長炉から取り出した後に、n型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層12の一部を露出させて、そのn型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層12の一部にn側電極としてTi/Au電極37を形成し、さらに、p型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層16上にはp側電極としてTi/Au電極18を形成する。そして、LiAlO<sub>2</sub>基板35とその上の層36、12～16及び電極を適\*

$$(c_{\text{GaN}} - a_{\text{LiAlO}_2}) / a_{\text{LiAlO}_2} = 3.2 \times 10^{-3} \quad \dots (1)$$

ただし、 $c_{\text{GaN}}$ はGaNのc軸方向の原子間距離、 $a_{\text{LiAlO}_2}$ はLiAlO<sub>2</sub>のa軸方向の原子間距離である。

【0089】また、GaNバッファ層のa軸方向におい ※

$$(2 \times a_{\text{GaN}} - c_{\text{LiAlO}_2}) / c_{\text{LiAlO}_2} = 1.8 \times 10^{-3} \quad \dots (2)$$

ただし、 $a_{\text{GaN}}$ はGaNのa軸方向の原子間距離、 $c_{\text{LiAlO}_2}$ はLiAlO<sub>2</sub>のc軸方向の原子間距離である。

【0090】このようにLiAlO<sub>2</sub>基板35とGaN層36との格子不整合が小さいと、{100}面か又はその面から $0 \sim 5$ 度オフした面のいずれかをLiAlO<sub>2</sub>基板35の主面となし、その主面の上にGaN層36を形成すると、GaN層36は熱膨張によるクラックが生じにくくなる。この場合、GaN層36のc軸は、LiAlO<sub>2</sub>基板35の主面から $0 \sim 5$ 度傾斜することになり、GaN層36ではc軸に垂直でない面内に歪みがかかることになる。この結果、GaN層36にかかる歪みは3軸異方性を示すことになり、これによってエネルギーバンド構造の価電子帯におけるHHとLHの2重の縮退が解けて、半導体レーザの閾値電流密度が低下する。

【0091】また、そのような(1-100)面成長した単結晶のGaN層をX線照射の回折の強度分布を示すロ

\*当に素子分離して半導体レーザを完成させる。

【0085】ところで、図7に示すように、正方晶のLiAlO<sub>2</sub>基板35の{100}面上に六方晶のGaNを成長すると、LiAlO<sub>2</sub>のa軸とGaNのc軸は平行になり、LiAlO<sub>2</sub>のc軸とGaNのa軸は平行になる。この結果、LiAlO<sub>2</sub>基板35の{100}面上では、GaNが(1-100)面を上にして成長することになるので、Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層12の下地面はGaN層36の(1-100)面となる。

10 【0086】したがって、第1例と同ように、Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層12、GaN光ガイド層13、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N活性層14、p型GaN光ガイド層15、p型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nクラッド層16の成長面も(1-100)面となり、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N活性層14はn型GaN光ガイド層13との格子定数の差により、(1-100)面内においては圧縮応力を受けるために、第1例と同ように3軸異方性を有することになる。

20 【0087】また、図7に示すように、正方晶のLiAlO<sub>2</sub>のa軸方向の原子間距離 $L_1$ は $5.1687 \text{\AA}$ 、正方晶のLiAlO<sub>2</sub>のc軸方向の原子間距離 $L_2$ は $6.2679 \text{\AA}$ の正方晶であり、また、六方晶のGaNのa軸方向の原子間距離 $L_3$ は $3.189 \text{\AA}$ であり、六方晶のGaNのc軸方向の原子間距離 $L_4$ は $5.185 \text{\AA}$ である。したがって、各原子間距離、a軸、c軸の方向を考え併せると、GaNバッファ層とLiAlO<sub>2</sub>基板の相互の格子不整合は次のようになる。

【0088】GaNバッファ層36のc軸方向において、GaNバッファ層36とLiAlO<sub>2</sub>基板35の格子不整合は、次式(1)のように小さい。

※て、GaNバッファ層とLiAlO<sub>2</sub>基板の格子不整合は、次式(2)のように小さい。

ッキングカーブを測定すると、図8に示すように、半値幅にして $200 \sim 500$ 秒(")の結晶性の良い膜が得られる。以上の説明では、LiAlO<sub>2</sub>基板上にGaN膜を形成することについて説明したが、図6(b)に示すように、LiAlO<sub>2</sub>基板35の上にAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x-y</sub>In<sub>y</sub>N層を直に形成する場合についても同ような結晶構造となる。即ち、{100}面又は{100}面から $0$ 又は $0 \sim 5$ 度オフした面をLiAlO<sub>2</sub>基板35の主面となし、その主面の上に第2例と同様に、n型Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.1</sub>Nクラッド層12、n型Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.65</sub>In<sub>0.2</sub>N光ガイド層13、Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N活性層14、p型Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.65</sub>In<sub>0.2</sub>N光ガイド層15、n型Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.1</sub>Nクラッド層16を順に形成し、それらの層から半導体レーザを構成してもよい。この場合の成長条件、膜厚などは、上記した第2例と同じにする。

50 【0092】ところで、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x-y</sub>In<sub>y</sub>N ( $0 \leq x \leq$

23

1、 $0 \leq y \leq 1$  の a 軸方向の原子間距離  $L_{a1}$  の式 (11) で示され、 $\text{LiAlO}_2$  の c 軸方向の原子間距離  $L_{a2}$  は式 (12) で示され、 $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x-y} \text{In}_y \text{N}$  の a 軸方向と  $\text{LiAlO}_2$  の c 軸方向は平行である。また、 $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x-y} \text{In}_y \text{N}$  の c 軸方向の原子間距離  $L_{c1}$  の式 (13) で示され、\*

$$L_{a1} = x a_{\text{AlN}} + a_{\text{GaN}} - x a_{\text{GaN}} - y a_{\text{GaN}} + y a_{\text{InN}} \quad \cdots (11)$$

$$L_{a2} = c_{\text{LiAlO}_2} \quad \cdots (12)$$

$$L_{c1} = x c_{\text{AlN}} + c_{\text{GaN}} - x c_{\text{GaN}} - y c_{\text{GaN}} + y c_{\text{InN}} \quad \cdots (13)$$

$$L_{c2} = a_{\text{LiAlO}_2} \quad \cdots (14)$$

それらの式では、 $a_{\text{AlN}}$  は  $\text{AlN}$  の a 軸方向の原子間距離、 $a_{\text{GaN}}$  は  $\text{GaN}$  の a 軸方向の原子間距離、 $a_{\text{InN}}$  は  $\text{InN}$  の a 軸方向の原子間距離、 $c_{\text{LiAlO}_2}$  は  $\text{LiAlO}_2$  の c 軸方向の原子間距離であり、また、 $c_{\text{AlN}}$  は  $\text{AlN}$  の c 軸方向の原子間距離、 $c_{\text{GaN}}$  は  $\text{GaN}$  の c 軸方向の原子間距離、 $c_{\text{InN}}$  は  $\text{InN}$  の c 軸方向の原子間距離、 $a_{\text{LiAlO}_2}$  は  $\text{LiAlO}_2$  の a 軸方向の原子間距離である。

【0094】また、 $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x-y} \text{In}_y \text{N}$  の組成比  $x$ 、 $y$  について、格子不整合が  $2 \times 10^{-2}\%$  となる条件の式 ※

$$y > \frac{a_{\text{GaN}} - a_{\text{AlN}}}{a_{\text{InN}} - a_{\text{GaN}}} x + \frac{0.98 c_{\text{LiAlO}_2} / 2 - a_{\text{GaN}}}{a_{\text{InN}} - a_{\text{GaN}}} \\ \approx 0.214 x - 0.328 \quad (15)$$

$$y < \frac{a_{\text{GaN}} - a_{\text{AlN}}}{a_{\text{InN}} - a_{\text{GaN}}} x + \frac{1.02 c_{\text{LiAlO}_2} / 2 - a_{\text{GaN}}}{a_{\text{InN}} - a_{\text{GaN}}} \\ \approx 0.214 x + 0.021 \quad (16)$$

$$y > \frac{c_{\text{GaN}} - c_{\text{AlN}}}{c_{\text{InN}} - c_{\text{GaN}}} x + \frac{0.98 a_{\text{LiAlO}_2} - c_{\text{GaN}}}{c_{\text{InN}} - c_{\text{GaN}}} \\ \approx 0.353 x - 0.209 \quad (17)$$

$$y > \frac{c_{\text{GaN}} - c_{\text{AlN}}}{c_{\text{InN}} - c_{\text{GaN}}} x + \frac{1.02 a_{\text{LiAlO}_2} - c_{\text{GaN}}}{c_{\text{InN}} - c_{\text{GaN}}} \\ \approx 0.353 x - 0.150 \quad (18)$$

【0096】(その他の例) 記の第1～第3の例においては、基板の主面として (1-100) 面、或いは、(11-21) 面等のジャスト面を用いているが、双晶等を抑制するために、(1-100) 面、或いは、(11-21) 面をオフ角  $\theta$  ( $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ ) の範囲内でオフした基板を用いても良い。

【0097】さらに、上記の例においては、活性層として  $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$  を用いているが、必要とする波長に応じて混晶比を  $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x-y} \text{In}_y \text{N}$  ( $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ) の範囲内で変えても良いものであり、且つ、それに伴って、光ガイド層及びクラッド層の混晶比を  $\text{Al}_a \text{Ga}_{1-a-b} \text{In}_b \text{N}$  ( $0 \leq a \leq 1$ 、 $0 \leq b \leq 1$ ) の範囲内で変えても良い。

【0098】上記の例においては光ガイド層を用いてい

24

\* $\text{GaN}$  の a 軸方向の原子間距離  $L_{c2}$  は式 (14) で示され、 $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x-y} \text{In}_y \text{N}$  の c 軸方向と  $\text{LiAlO}_2$  の a 軸方向は平行である。

【0093】

10 ※ (15) ~ (18) を求め、これを  $x$ 、 $y$  座標に描いたところ、式 (15) ~ (18) の条件を満たす  $x$ 、 $y$  は、図9の斜線で示した領域となり、その斜線で示した  $x$  と  $y$  の組成比を選択すると結晶性が良くて熱膨張などによるクラックが結晶に生じにくくなる。なお、式 (15) は、 $x \leq 1$  では  $y$  が負となるので、図9において表されていない。

【0095】

【数1】

$$0.98 c_{\text{LiAlO}_2} / 2 - a_{\text{GaN}} \\ a_{\text{InN}} - a_{\text{GaN}}$$

(15)

$$1.02 c_{\text{LiAlO}_2} / 2 - a_{\text{GaN}} \\ a_{\text{InN}} - a_{\text{GaN}}$$

(16)

$$0.98 a_{\text{LiAlO}_2} - c_{\text{GaN}} \\ c_{\text{InN}} - c_{\text{GaN}}$$

(17)

$$1.02 a_{\text{LiAlO}_2} - c_{\text{GaN}} \\ c_{\text{InN}} - c_{\text{GaN}}$$

(18)

るが、必ずしも必要なものでなく、クラッド層と活性層とによって直接ヘテロ接合を形成しても良く、さらに、光ガイド層及びクラッド層は必ずしも上下対称的にする必要はなく、互いに混晶比の異なる  $\text{Al}_a \text{Ga}_{1-a-b} \text{In}_b \text{N}$  を用いても良いものである。また、上記した例に用いた原料も上記の原料に限られるものではなく、有機金属原料はメチル系に代えてエチル系、即ち、 $\text{TEGa}$  (トリエチルガリウム)、 $\text{TEAl}$  (トリエチルアルミニウム)、及び、 $\text{TEIn}$  (トリエチルインジウム) を用いても良く、さらに、窒素 (N) 源としてもアンモニアの代わりに、 $\text{N}_2\text{H}_4$ 、 $(\text{CH}_3)_3\text{CNH}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{N}_3$ 、或いは、 $\text{CH}_3\text{NH} \cdot \text{NH}_2$  を用いても良い。

【0099】さらに、不純物原料も、n 型用としては  $\text{SiH}_4$  の代わりに、 $\text{SiH}_4$  或いは  $\text{CH}_3\text{SiH}_3$  を用いても良

く、また、p型用としてはビスシクロペンタジエニルマグネシウム  $[(C_5H_5)_2Mg]$  の代わりに、 $(CH_3C_5H_4)_2Mg$ 、 $(C_5H_5C_5H_4)_2Mg$ 、 $(i-C_3H_7C_5H_4)_2Mg$ 、或いは、 $(n-C_4H_7C_5H_4)_2$ を用いても良い。

(第2実施形態) 図10は本実施形態の面発光半導体レーザの基本構造を示す斜視図である。図11は本発明の活性層の結晶方位を表す図であり、図10に表された半導体レーザの活性層の結晶方位と座標軸との関係を表している。

【0100】本発明の第一の構成では、図10を参照して、基板41の上方に形成された活性層42は、その面内にc軸を有する六方晶の半導体層から構成される。即ち、図10及び図11に示すように、活性層42の主面内にxz平面を活性層42の垂直方向にy軸をとるとき、活性層42を構成する六方晶半導体結晶のc軸の方向、即ち<0001>方向を、活性層42面内にあるz軸に向けて配置する。

【0101】このように活性層42の面内にc軸を含むようにすることにより、以下に説明するように発振光の偏光面が規定される。なお、x及びy軸方位の結晶方位はとくに制限されないが、例えば、<11-20>方向を活性層42の面内にあるx軸に、かつ<1-100>方位を活性層2の膜厚方向にあるy軸とすることができる。

【0102】以下、本実施形態において発振光の偏光面が規定される理由を説明する。初めに活性層内に歪がない場合について説明する。図12はGaNのエネルギーバンド構造図であり、六方晶半導体のバンド構造を表している。図12に示すように、GaNの価電子帯VBは、電子の波動ベクトル $k=0$ の近傍で、HH、CH及びLHの3つのバンドが禁止帯の底の近くに存在する。

【0103】ここで、GaN中に歪が無い場合、波動ベクトル $k=0$ において、最もエネルギーが高い価電子帯のバンドをHHバンドと、次にエネルギーが高いものをLHバンドと、最低のエネルギーのものをCHバンドとしている。なお、これらのHH、LH、CHバンドは結晶のc軸方向をXYZ3軸直交座標のZ軸にとるとき、c軸に垂直な方向に分極を有する2つのp軌道関数 $p_x$ 及び $p_y$ と、c軸方向に分極を有する軌道関数 $p_z$ とを用いて次のように表される。

【0104】

HHバンド;  $(p_x + p_y) / \sqrt{2}$

LHバンド;  $(p_x - p_y) / \sqrt{2}$

CHバンド;  $p_z$

このうちHHバンドが最も禁止帯の底に近いので、伝導帯CBから価電子帯VBへの自然放出はHHバンドへの発光遷移が優先する。このHHバンドはp軌道の結合状態からなり、c軸廻りに対称である。このため、GaNの自然放出に伴う発光は、c軸に垂直に電場が振動する偏光状態を有する。また、かかる偏光を生ずる遷移確率

は、振動方位のc軸廻りの回転に対して等価である。なお、上述の説明はGaNについてしたが、六方晶半導体結晶についても同ようである。なお、閃亜鉛鉱型半導体結晶では、三軸等方であるため光学特性は等方的である。

【0105】従来の垂直共振器を有する面発光半導体レーザでは、図26に示すように、活性層102はc軸104に垂直に形成されるから、発振光はc軸104に沿って進行する。このため発振光の偏光面はc面となり、電場はc軸104に垂直に振動する。その結果、上述した自然放出光の偏光のc軸廻りの対称性から、XY面内の何れの方向に振動する発振光も同等に生ずる。従って、発振光の偏光面は固定されず、発振が不安定となる。

【0106】他方、本実施形態では、図10に示すように、活性層42は面内にc軸を有するから、発振光の進行方向はc軸に垂直である。既述のようにHHがバンド端の場合に自然放出光の電場の振動方向はc軸に垂直であるから、発振光の電場の振動方向は、c軸と発振光の進行方向との両方位に垂直な方向、即ち、活性層面内に含まれかつc軸に垂直な方向に一義的に定まる。

【0107】従って、本構成の面発光半導体レーザでは、活性層に垂直に進行する発振光の電場方向はc軸に垂直な方向に固定される。なお、面発光半導体レーザでは、共振器が膜厚方向にあるので、トップバンドによって決定される偏光方向(発光の電場ベクトルの方向)は、必ず活性層面内である必要がある。即ち、発光の電場ベクトルの向きを決定するトップバンドの分極は、活性層面内にある必要がある。

【0108】次に、活性層のPL(フォトルミネッセンス)発光波長とその偏光面方位について説明する。図13は、HHがバンド端の場合の本発明の活性層のPL発光特性を表す図であり、第一の構成の半導体レーザに用いられるc軸を面内に有するGaN薄膜からなる活性層のPL発光強度の計算値を表している。図13中のパラメータは、PL光の偏光面の方位、即ち、活性層表面内での電場の振動方向とc軸とのなす角度 $\theta$ である。なお、以下の説明はGaNに限らず、六方晶半導体結晶についても同様に適用できる。

【0109】図13に示すように、活性層のPL発光を偏光面、即ち電場の偏光面と波長とについて分光したとき、PL光の偏光面がc軸に直交する場合(図中の90°で示す)に、活性層のPL発光スペクトル強度は最大となる。この最大強度に対応する波長は約366nmであり、この波長は、図12に示すように、伝導帯CBから価電子帯VBのHHバンドへの推移による発光に対応している。他方、PL光の偏光面がc軸に平行な場合(図中の0°で示す)、発光強度は小さく、そのスペクトルの極大の波長は略360nmと短くなる。これは、PL発光の偏光面をc軸に垂直な偏光面からc軸に平行な偏光面に変化することで、PL発光が、HHバンドへの遷移

による発光からCHバンドへの遷移による発光に移行したことを示している。

【0110】即ち、x軸方向へ分極するp軌道からなるHHバンドへの遷移は偏光面がc軸に垂直な光のみを放出するのに対し、CHバンドはz軸方向へ分極するp軌道からなるため、c軸に平行な偏光面を有する光の放出はCHバンドへの遷移により初めて可能となるからである。また、本実施形態では、半導体層2のフォトルミネッセンス光の偏光面及び波長をフォトルミネッセンス光強度が最大となるように選択した場合に、フォトルミネッセンス光の波長と、光共振器の共振波長とを合わせる。この波長の光のエネルギーは、電子のHHバンドへの遷移に伴う発光のフォトエネルギーに等しい。従って、かかる波長で発振させることにより、発振光をHHバンドへの電子の遷移による発光のみに制限することができる。この場合、c軸に平行な偏光面を有するCHバンドへの遷移に伴う発光は混在できないから、発振光の偏光面の変動を一層確実に防止することができる。

【0111】なお、その共振波長は、厳密に最大強度が得られる波長である必要はない。例えば、主としてHHバンドへの電子の遷移に伴う発光が起こり且つCHバンドへの遷移に伴う発光が少なく、しかもその結果、HHバンドへの電子の遷移による発振からCHバンドへの電子の遷移による発振へ発振モードが変動することを抑制できる程度に、最大強度に近い波長であればよい。

【0112】次に活性層内に歪がある場合について説明する。図14(a)～(e)は、GaNのエネルギーバンドの歪依存性を表す図であり、歪みを有するGaNの価電子帯のエネルギーの計算値を表している。なお、図11を参照して、 $\langle 0001 \rangle$ 方向の歪を $\varepsilon_z$ 、 $\langle 11-20 \rangle$ 方向の歪を $\varepsilon_x$ 、及び $\langle 1-100 \rangle$ 方位の歪を $\varepsilon_y$ とし、それぞれの歪みの値は、圧縮歪の状態を負に、引張歪の状態を正として示されている。

【0113】図14(a)は、 $\varepsilon_z = 0$ とし、 $\varepsilon_x$ を変えた場合である。なお、 $\varepsilon_y$ は、yが成長方向のため拘束の無い状態である。即ち、結晶の $\langle 11-20 \rangle$ 方向に一軸歪を加えたときの価電子帯のエネルギーの変化を計算した結果である。同ように、図14(b)は、 $\varepsilon_z$ に0.5%の引張歪を付加し、さらに $\varepsilon_x$ を加えた場合である。また、図14(c)、(d)はそれぞれ $\varepsilon_z$ に0.5%及び1.0%の圧縮歪を付加し、さらに $\varepsilon_x$ を加えた場合である。なお、 $\varepsilon_y$ の拘束は無い状態である。

【0114】図14(a)～(c)を参照して、歪 $\varepsilon_x$ が圧縮で $\varepsilon_x$ が1.0%以上の圧縮の場合は、p軌道からなるX又はZブランチがエネルギーバンド構造の禁止帯の底(即ち、価電子帯の最上)に位置する価電子帯のバンドとなる。従って、伝導帯からの発光遷移はX又はZブランチへの遷移が優先的に起こり、その結果、Xが上の場合は上述した歪が無い場合の発光と同様に、c軸に垂直な偏光面を有する光のみが発振する。また、Zがバ

ンド端の場合はc軸に平行な光が発振する。

【0115】一方、図14(d)を参照して、歪 $\varepsilon_x$ が1%以上の圧縮歪を有し、かつ $\varepsilon_x$ が引張歪の場合は、X及びYブランチよりもZブランチの方がエネルギーが高くなる。このため、伝導帯からの電子の遷移については、Zブランチへの推移が優先してc軸に平行な偏光面で発振する光が生じる。なお、前述したように面発光半導体レーザは、活性層に垂直に共振器があるため、電場ベクトルは活性層面内である必要がある。従って、電場ベクトルを決定するトップバンドの波動関数の分極が活性層面内にあることが必要となる。即ち、図11のような構造を作製するには、Y方向が共振器となるため、Yがトップバンドでは発振しない。

【0116】図14(e)は、 $\varepsilon_y$ を拘束の無い状態としたとき、 $\varepsilon_z = \varepsilon_x$ とした場合、言い換えれば $\langle 0001 \rangle$ と $\langle 11-20 \rangle$ を含む面内に面内二軸性歪を与えた場合の価電子帯のエネルギーバンドの計算値である。面内圧縮歪に対して、Xが最もエネルギーが高く、この場合はa軸方向に電場方向のある発振光が生ずる。なお、光の進行方向がYブランチの分極方向を向く場合は、CHバンドへの遷移に基づく発振が生ずる。

【0117】上述のように、活性層に歪を有する場合は、発振光はc軸に垂直な偏光面を有する場合と、c軸に平行な偏光面を有する場合とが生ずる。しかし、いずれの場合も発振光の偏光面は光共振器の光軸と結晶軸方向により一義に定まるから、面発光半導体レーザの偏光面は予め規定されかつ偏光面は変動しない。ところで、図10に示す構成において、活性層42としては、GaN、InGaN若しくはAlGaInNを含む多重量子井戸層(MQW)、又は、GaN、InGaN若しくはAlGaInNからなる単層のいずれかを選択する。

【0118】また、図10に示した基板41として、 $\langle 11-20 \rangle$ 面を主面とするSiC基板を用いてもよい。また、 $\langle 1-100 \rangle$ 面を主面とするSiC基板、又は、 $\langle 1-102 \rangle$ 面を主面とするサファイア基板を用いてもよい。さらに、その基板41の主面の上には、第一導電型の第一の障壁層47、活性層42、第二導電型の第二の障壁層48が順次成長され、それらによってダブルヘテロ接合構造が構成される。また、そのダブルヘテロ接合構造の上又は下に反射面を形成すると、第一の障壁層47、活性層42、第二の障壁層48を光共振器として構成することができる。第一及び第二の障壁層47、48の構成材料をAlGaInとし、さらに、活性層42をAlGaIn又はGaN又はInGaNの単層、又は、そのような材料を含む多重量子井戸層から構成することにより、c軸が面内に存在するGaN系半導体からなる活性層42を有する面発光半導体レーザが実現される。

【0119】次に、本実施形態を図面に基いてさらに説明する。本出願の発明者は、活性層42のPL発光のスペクトルを測定することにより、PL発光の波長と偏



【0125】次いで、DBR鏡43の一側方の領域にある各層を反応性イオンエッチング（RIE）法によりエ

【0130】さらに、n型及びp型の障壁層56、59はそれぞれ $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ から構成され、そのうちのn型の障壁層56は、不純物濃度 $2 \times 10^{18} \text{ atoms/cm}^3$ でSi

がドーピングされ、また、p型の障壁層59は、不純物濃度  $1 \times 10^{17}$  atoms/cm<sup>3</sup> でMgがドーピングされている。p型の障壁層の上のコンタクト層60aには  $1 \times 10^{18}$  atoms/cm<sup>3</sup> でMgがドーピングされている。

【0131】n型の障壁層56からp型の障壁層59までの複数の層は、SCH(separateconfinement heterostructure)構造を構成している。このように積層した化合物半導体層は、複数回のパターンニングを経て図18(a), (b)に示すような断面構造及び平面構造の形状に加工されている。すなわち、面発光半導体レーザ66と受光素子67は同じ形状を有しており、コンタクト層60aからn型の障壁層56の上部までは直径20μmの円柱部62となり、さらにn型の障壁層56の下部からミラー層55の上部までは円柱部の外方に広がったフランジ部63となっている。ミラー層55はアンドープであり、高抵抗となっているので、円柱部62とフランジ部63は他の領域の化合物半導体層から略筒状の溝61を介して電氣的に分離されている。

【0132】そして、円柱部62のコンタクト層60aの上面上には、中央に直径10μm程度の光放出窓64aを有する環状のTiよりなるp側電極64が接続され、また、フランジ部63のn型障壁層56には、円柱部62に接触しないNiよりなるn側電極65が接続されている。以上のような円柱部62とその下のn型の障壁層56によって膜厚方向の共振器が形成される。

【0133】フォトダイオード67は、図18(b)に示すように、面発光半導体レーザ66の周囲に離れて複数個、例えば4個形成されている。それらのような面発光半導体レーザ66とフォトダイオード67を有する光装置は、例えば光磁気ディスク装置に取付けられる。そして、面発光半導体レーザ66ではp側電極64とn側電極65に正バイアスの電圧68が印加されて小さくても閾値電流が供給される。また、フォトダイオード67ではp側電極64とn側電極65に逆バイアスの電圧が印加され、これによりフォトダイオード67への入射光量によって検出回路69に流れる電流値が大きくなる。

【0134】この場合、面発光半導体レーザ66が発振して窓64aを通して光が照射され、図示しない回折格子、レンズなどを通して光磁気ディスクに照射される。光磁気ディスクで反射したその光は、レンズ、偏向プリズムを通して4つの受光素子67に入力する。その面発光半導体レーザ66では、既に説明したように、基板41のc軸の垂直方向が電場の振動方向となる光を発振し偏光面が固定されるから、レーザ光の偏光面が揃うことになる。しかも、光磁気ディスクで反射したレーザ光は、同じ偏光面のフォトダイオード67に入射する。

【0135】このように、同じ基板上に形成された面発光半導体レーザ66とフォトダイオード67が偏光面を有することになったので、光磁気ディスク装置の書き込み用光素子と読み出し用光素子を集積化することができ、

それらの装置の小型化と製造効率が良くなる。以上のように、本実施形態によれば、活性層に垂直な共振軸を有する垂直共振型の面発光半導体レーザにおいて、発振光の偏光面が活性層の結晶方位により一義に規定されるため、発振光の偏光方位を予め定めることができ、かつ偏光方位の変動が少ない安定した動作特性を有する垂直共振型の面発光半導体レーザを提供することができるので、情報処理装置の性能向上に寄与するところが大きい。

10 【0136】なお、活性層58は、GaN、InGaN、AlGaInN又はAlGaInNのいずれから形成してもよいし、また、半導体よりなる障壁層57、59は、GaN、InGaN、AlGaInN又はAlGaInNから構成してもよい。ただし、活性層58と障壁層57、59が同じ材料系より構成する場合には、障壁層57、59よりも活性層58の方がエネルギーバンドギャップが小さくなる組成比を選択する必要がある。

【0137】なお、基板の材料として炭化シリコン(SiC)の他にサファイアを使用してもよい。

20 (第3実施形態)従来の発光ダイオードは、光の出射方向に対して円偏光であるので、直線偏光を得たい場合には、ボラロイド等の偏光子を通すことによって直線偏光した偏光光を得ていた。

【0138】また、直線偏光した偏光光を利用して立体画像を表示する場合、右目用画像と左目用画像を互いに偏光方向の異なる光で表示し、それを互いに偏光方向の異なる右目用偏光子と左目用偏光子を介して見ることによって立体画像として認識しており、特に、大型立体画像表示装置の場合には、投影方式を採用している。しかし、従来の発光ダイオードを用いて直線偏光を得ようとする場合には、偏光子を必要とするため部品点数が多くなるという問題があり、且つ、発光ダイオードと偏光子とを組み合わせる工程が必要になるため、生産コストが高くつくという問題がある。

【0139】また、偏光子を介して円偏光を特定の方向に偏光した直線偏光にしているので、偏光子の偏光方向と偏光方向の異なる光は取り出せず無駄になるので、発光効率が悪いという問題がある。さらに、大型立体表示装置の場合には、投影方式であるため、従来の投影方式の表示装置と同様に、明るいところでは表示画像が非常に見づらくなり、実質的に利用できないという問題もある。

【0140】図19は本実施形態の原理的構成の説明図であり、この図19を参照して本発明における課題を解決するための手段を説明する。本実施形態は、図19(a)及び(b)に例示するように、発光ダイオード70において、発光ダイオード70を構成するウルツ鉱型化合物半導体結晶のc軸方向が光の放出方向とほぼ直交していることを特徴とする。

50 【0141】このようにGaNのようなウルツ鉱型化合物

半導体を用いた場合、ウルツ鉱型化合物半導体は、GaAs等の他のIII-V族化合物半導体と異なり六方晶系であり、このようなウルツ鉱型化合物半導体における発光は伝導帯から価電子帯のHH (Heavy Hole)あるいはLH (Light Hole)への遷移によって起こるが、これらはa軸方向に関するバンドであるため、c軸方向、即ち、 $\langle 0001 \rangle$ 方向に垂直な方向に偏光した光が強く現れ、逆にc軸方向に平行に偏光した光はほとんど現れないので、偏光子を用いなくとも直線偏光した光が得られることになる。

【0142】なお、本発明において、c軸方向が光の放出方向とほぼ直交するとは、c軸と最も強度の大きな光の放出方向とが純粋に直交するもの以外に、 $\pm 5^\circ$ の範囲の角度を含むものである。また、本実施形態は、ウルツ鉱型化合物半導体結晶のc軸方向と結晶成長方向とが一致していることを特徴とする。

【0143】成長基板として、サファイアの $\{0001\}$ 面、 $\{11\bar{2}0\}$ 面、6H-SiCの $\{0001\}$ 面、或いは、スピネルの $\{111\}$ 面を用いた場合、ウルツ鉱型化合物半導体結晶の結晶成長方向はc軸方向となるので、図1(a)に示すように活性層に平行に光を取り出すことによって、直線偏光した光が得られる。なお、本明細書においては、“1パー”或いは“2パー”等の結晶方位を便宜的に、“-1”或いは“-2”等として表す。

【0144】また、本実施形態は、ウルツ鉱型化合物半導体結晶のc軸方向と結晶成長方向とがほぼ直交していることを特徴とする。成長基板の主面として、サファイア基板のr面、即ち、 $\{1\bar{1}02\}$ 面、又は、6H-SiCの $\{1\bar{1}00\}$ 面若しくは $\{11\bar{2}0\}$ 面を用いた場合、ウルツ鉱型化合物半導体結晶の結晶成長方向はc軸方向とほぼ平行になるので、図1(b)に示すように活性層に垂直に光を取り出すことによって、直線偏光した光が得られ、且つ、広い面からの光が偏光光となるので、発光領域を大きく取ることができる。

【0145】また、本実施形態は、上記したウルツ鉱型化合物半導体が、III族の窒化物からなるIII-V族化合物半導体であることを特徴とする。このように、ウルツ鉱型化合物半導体として、安定な結晶構造を有するGaN系化合物半導体等のIII族の窒化物からなるIII-V族化合物半導体を用いることによって、1.9eV~6.2eVの広い範囲に渡り高効率の短波長発光が得られ、混晶比を調整することによって、所望の発光波長を得ることができる。

【0146】さらに、本実施形態は、表示装置において、光の放出方向がc軸方向とほぼ直交するウルツ鉱型化合物半導体結晶からなる複数の発光ダイオード70を用い、この複数の発光ダイオード70を、偏光方向がある方向uに偏光した右目用発光ダイオードと、右目用発光ダイオードの偏光方向uに垂直な方向vに偏光した左

目用発光ダイオードとになるように配置し、立体表示を得るようにしたことを特徴とする。

【0147】光の放出方向がc軸方向とほぼ直交するウルツ鉱型化合物半導体結晶からなる発光ダイオード70は、c軸方向に垂直に、即ち、a軸方向に偏光しており、このa軸方向に偏光した発光ダイオード70を光の放出方向を軸として $90^\circ$ 回転させた場合には、c軸方向に垂直で、且つ、回転させる前の偏光方向に対して垂直に偏光した直線偏光光となるため、一方を右目用とし、他方を左目用とすることによって、立体画像の表示が可能になる。

【0148】なお、図19において、69a、69bは、発光ダイオード70に接続される1対の端子を示している。

#### 第1例

ここで、図20(a)、(b)及び図21(a)、(b)を参照して、本実施形態の第1例を説明する。図20(a)は発光ダイオードの断面図であり、図20(b)は発光ダイオードを素子化した場合の断面図である。また、図21(a)はGaN系化合物半導体のΓ点近傍のバンドダイヤグラムであり、さらに、図21(b)は、発光強度の偏光角分布を示す図である。

【0149】まず、図20(a)に示すように、 $\{0001\}$ 面、即ち、c面を主面とするサファイア基板71上に、MOVPE法(有機金属気相成長法)を用いて、厚さ5~50nm、例えば20nmのGaNパッド層72、厚さ0.5~5.0μm、例えば、3.0μmのn型Al<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N層73、厚さ10~100nm、例えば50nmのIn<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N活性層74、及び、厚さ0.1~1.0μm、例えば0.5μmのp型Al<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N層75を順次エピタキシャル成長させる。

【0150】次いで、n型Al<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N層73の一部が露出するように反応性イオンエッチング法によってエッチングしたのち、p型Al<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N層75の表面にp側電極としてNi電極76を設けるとともに、n型Al<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N層73の露出表面にn側電極としてTi電極77を設ける。なお、この場合、GaNパッド層72からp型Al<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N層75までの各層は、サファイア基板71のc軸方向に成長するので、そのc軸はサファイア基板71の主面と垂直になる。そのc軸方向は $\langle 0001 \rangle$ 方向と等価である。

【0151】上記のようにして形成した発光ダイオード78を、図20(b)に示すように、その光の放出方向が、c軸方向とほぼ垂直になるようにステム79にマウントする。この場合、ステム79に対しては短絡を防止するために絶縁体スペーサ80を介してマウントするとともに、n側電極であるTi電極77をマイナス端子81にワイヤボンディングし、また、p側電極であるNi電極76をプラス端子82にワイヤボンディングし、最後に、エポキシ樹脂等で樹脂モールドする。

【0152】図21(a)は、GaN系化合物半導体のΓ点近傍のバンドダイヤグラムであり、図から明かなように、価電子帯におけるホールからみてエネルギー的に一番低いバンド、即ち、HH (Heavy Hole) と LH (Light Hole) が2重に縮退し、スピン軌道相互作用による分だけエネルギー的に分離しており、また、それ以外に、GaN系化合物半導体に特有なCHというバンドが現れる。

【0153】そして、このようなGaN系化合物半導体においては、Γ点、即ち $K_z = 0$ における伝導帯とHHバンド及びLHバンドとの間の遷移によって発光が生ずることになるが、Γ点におけるHHバンド及びLHバンドはa軸方向に関するバンドであるのでc軸に垂直な方向に偏光した光が得られることになる。図21(b)は、本発明の本実施形態の発光ダイオードの光の放出方向からみた発光強度の偏光角分布を示す図であり、a軸に平行な、即ち、a軸方向に偏光した光が得られるが、a軸に対して $90^\circ$ 偏光した、即ち、a軸に垂直に偏光した光は殆ど得られない。

【0154】したがって、本発明においては、偏光子等を用いることなく特定の方向に偏光した直線偏光光を得ることができるので、部品点数が増加することなく、且つ、発光ダイオードと偏光子の組み合わせ工程が不要になるので、生産コストを低コストにすることができる。なお、この第1例においては、基板として、(0001)面を主面とするサファイア基板を用いているが、

(0001)面を主面とするサファイア基板に限られるものではなく、(11-20)面を主面とするサファイア基板(0001)面を主面とする6H-SiC基板、或いは、(111)面を主面とするスピネル基板を用いても良いものである。

#### 【0155】第2例

次に、図22を参照して本発明の第2の例を説明する。まず、図22(a)に示すように、(1-102)面、即ち、Γ面を主面とするサファイア基板91上に、MOVPE法を用いて、厚さ5~50nm、例えば20nmのGaNパッファ層92、厚さ0.5~5.0μm、例えば3.0μmのn型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層93、厚さ10~100nm、例えば50nmの $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 活性層94、及び、厚さ0.1~1.0μm、例えば0.5μmのp型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層95を順次エピタキシャル成長させる。

【0156】次いで、反応性イオンエッチング法によってn型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層93の一部を露出させたのち、p型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層95の表面にp側電極として非常に薄いNiからなる半透明電極96を設けるとともに、n型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層93の露出表面にn側電極としてTi電極97を設ける。なお、この場合、GaNパッファ層92からp型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層95の各層のc軸の方向は、サファイア基板91の基板面内の方向に向いて成長するので、c軸は基板面と平行になる。

【0157】そのようにして形成された発光ダイオード

84は、図22(b)に示すように、その光の放出方向をc軸方向とほぼ垂直になるように導電性ペーストを用いてステム85にマウントする。そして、n側電極であるTi電極97をマイナス端子86にワイヤボンディングすると共に、p側電極である半透明電極96をプラス端子87にワイヤボンディングし、最後に、エポキシ樹脂等のモールド樹脂88によって封止する。

【0158】この場合にも、第1例と同様に、光の放出方向はc軸に垂直であるので、a軸方向に偏光した光が得られ、a軸に対して $90^\circ$ 偏光した、即ち、a軸に垂直に偏光した光は殆ど得られない。したがって、本発明においては、偏光子等を用いることなく特定の方向に偏光した直線偏光光を得ることができるので、部品点数が増加することなく、且つ、発光ダイオードと偏光子の組み合わせ工程が不要になる。この結果、発光ダイオードの生産コストは低コストになる。

【0159】また、この第2例の場合は、面発光型であるので、上記の第1例に比べて発光領域を大きくすることができ、第1例と比べて10倍程度の発光強度が期待できる。なお、第2例においては、基板として、r面を主面とするサファイア基板を用いているが、r面を主面とするサファイア基板に限られるものではなく、(1-100)面を主面とするSiC基板、或いは、(11-20)面を主面とするSiC基板を用いても良いものである。

【0160】また、第2例においては、p側電極として薄いNi膜からなる半透明電極96を用いているが、半透明電極96に限られるものではなく、通常の厚さのNi電極をメッシュ状に設けて、メッシュの間から光を取り出すようにしても良い。

#### 第3例

次に、図23を参照して本発明の第3例を説明する。

【0161】図23は、上記の第1例、第2例の発光ダイオードを用いた立体画像表示用の表示パネル90を表すものである。例えば、第1例の発光ダイオードを用いて、その偏光方向がX方向になるように配置した発光ダイオード98と、この発光ダイオード98の光軸を中心として偏光方向を $90^\circ$ 回転させて配置したY方向に偏光する発光ダイオード99とを組み合わせ構成したものである。なお、X方向とY方向は、ともに表示パネル90の面に対して平行であり、かつ、X方向とY方向は互いに直交する関係にある。

【0162】この場合、一方の発光ダイオード98を右目用とし、他方の発光ダイオード99を左目用とし、両者に互いに異なった画像信号を入力し、この発光表示画像を右目用と左目用とで互いに異なった偏光子を介して見ることによって立体画像を表示することになる。なお、この場合、a軸方向に純粋に平行な角度に対して $\pm 20^\circ$ 程度の範囲の偏光角の光を有効に利用することができる。

【0163】この第3例の表示装置は、発光表示であるので、従来の投影方式の立体表示装置より輝度を高くすることができ、したがって、大型化した場合にも明るい場所での使用が可能になる。この場合、例えば、100インチの表示パネル90を構成する場合には、約200万画素で構成することになる。そして、X方向に偏光した発光ダイオード98とY方向に偏光する発光ダイオード99との配置は、図23に示すように1個毎交互に配置しても良いし、或いは、特に図示しないが、画素毎に纏まった個数の発光ダイオードを交互に配置しても良く、さらに、各発光ダイオードの発光波長を調整することによってカラー表示も可能になる。

【0164】なお、上記の実施の形態における面方位は一例であり、記載されている面方位と結晶学的に等価な全ての面を含むものである。また、上記の各例においては、活性層としてIn組成比が0.1の $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を用いているが、必要とする波長に応じて混晶比を $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq y \leq 1$ ) の範囲内で変えても良いものであり、それに伴って、活性層を挟むp型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層及びn型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層を活性層より禁制帯幅の大きな $\text{Al}_a\text{In}_b\text{Ga}_{1-a-b}\text{N}$  ( $0 \leq a \leq 1$ ,  $0 \leq b \leq 1$ ) で構成すれば良い。

【0165】さらに、GaN基板の代わりにサファイア基板を使用する場合には、基板の主面を(11-20)面とする。以上述べたように、本実施形態によれば、GaN系化合物半導体等のウルツ鉱型化合物半導体を用いて発光ダイオードを構成する場合、光の放出方向をウルツ鉱型化合物半導体のc軸と垂直にすることによって、偏光子を用いることなく直線偏光した光を得ることができ、また、このようは直線偏光した発光ダイオードを用いることによって、明るい場所でも使用が可能な発光表示による立体画像表示装置を構成することができる。

【0166】

【発明の効果】以上述べたように本発明によれば、結晶基板の主面を選ぶことによって、その結晶基板の上に形成される六方晶型又はウルツ鉱型の半導体層のc軸がその半導体層の面に対して垂直でなくなるために、その結晶基板の上に形成される六方晶型又はウルツ鉱型の活性層に、面方向の圧縮歪又は引張歪をかけてその活性層に3軸異方性を持たせることができ、活性層の価電子帯での縮退を解くことができ、そのような活性層を有する半導体レーザの発振の閾値電流を低下することができる。

【0167】また、そのような構造によれば、化合物半導体層による発光の偏光面が一義的に決定できるので、そのような結晶基板の上に障壁層、活性層などを成長して面発光半導体レーザを形成すると、活性層の面内異方性が大きくなって電場ベクトルが一方向に定められるため、偏光が決定できる。さらに、面発光半導体レーザの発振光の偏光面が一義的に定まると、光磁気ディスク装置の光源としての使用が可能になるとともに、面発光半

導体レーザと同一基板上に受光素子を製造することが容易になる。これにより、従来行っていた半導体レーザと受光素子の取付け作業が不要になるとともに、受発光装置の小型化をさらに促進することができる。

【0168】一方、発光ダイオードを構成するウルツ鉱型化合物半導体結晶のc軸方向が、光の放出方向とほぼ直交するようにすると、偏光方向が定まるので、そのような発光ダイオードを表示装置の表示面に複数個配置し、1つの発光ダイオードによって画素の一部又は全部を構成するようにするとともに、隣接する発光ダイオードの偏光方向を互いに90度相違し、これにより、右目偏光方向用の発光ダイオードと左目偏光用の発光ダイオードを隣接することができ、立体表示装置で偏光子を省略して部品点数を減らし、製造コストを低減できる。しかも、そのような表示装置は画像が明るくなる。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1(a)は、本発明の第1実施形態のクラッド層と活性層の層構造図、図1(b)は、図1(a)の層構造によって得られる活性層の価電子帯エネルギーバンド構造図、図1(c)は、本発明の第1実施形態で使用する基板の主面の面方位を示す図である。

【図2】図2(a)は、本発明の第1実施形態の層構造を採用した半導体レーザの第1の例を光出力端から見た層構造図、図2(b)は、図2(a)の層構造によって得られる活性層の価電子帯エネルギーバンド構造図、図2(c)は、2つのクラッド層と活性層の相対的なエネルギーバンド構造図である。

【図3】図3は、本発明の第1実施形態の層構造を採用した半導体レーザの基板を高抵抗材から形成する場合の構造図である。

【図4】図4(a)は、本発明の第1実施形態の層構造を採用した半導体レーザの第2の例を光出力端から見た層構造図、図4(b)は、図4(a)の層構造によって得られる活性層の価電子帯エネルギーバンド構造図である。

【図5】図5(a)は、本発明の第1実施形態の層構造を採用した半導体レーザの第3の例の斜視図、図5(b)は、図5(a)の半導体レーザにおける基板主面に対する小面の傾斜角度を示す図である。

【図6】図6(a)は、本発明の第1実施形態の層構造を採用した半導体レーザの第4の例を光出力端から見た層構造図、図6(b)は、その第4の例で基板を高抵抗材料から構成した場合の半導体レーザを光出力端から見た層構造図である。

【図7】図7は、本発明の第1実施形態において、主面に平行なc軸を有する正方晶基板の主面の上に、六方晶半導体層を形成する場合の各結晶の完面像の特殊形の相対的關係を示す図である。

【図8】図8は、本発明の第1実施形態において、正方晶基板上に形成した六方晶層のX線回折ロッギングカーブを示す図である。

【図 9】図 9 は、正方晶の  $\text{LiAlO}_2$  基板上に六方晶の  $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{In}_y\text{N}$  層を成長する場合に、組成比  $x$  と組成比  $y$  の関係を示す  $x-y$  座標図である。

【図 10】図 10 は、本発明の第 2 実施形態を示す面発光レーザの電極を除いた層構造を示す斜視図である。

【図 11】図 11 は、本発明の第 2 実施形態を示す面発光レーザの活性層の結晶の完面像の特殊形を示す斜視図である。

【図 12】図 12 は、本発明の第 2 実施形態の面発光レーザの活性層のエネルギーバンド構造図である。

【図 13】図 13 は、本発明の第 2 実施形態の面発光レーザにおいて、活性層の偏光面の方位と  $c$  軸のなす角度をパラメータにした場合の波長と PL 発光強度の関係を計算で求めた図である。

【図 14】図 14 (a) ~ (e) は、本発明の第 2 実施形態の面発光レーザにおいて、活性層を構成する GaN のエネルギーバンドの結晶歪依存性を示す図である。

【図 15】図 15 は、本発明の第 2 実施形態の面発光レーザにおいて、活性層の偏光面の方位と  $c$  軸のなす角度をパラメータにした場合の波長と PL 発光強度の関係の実験により求めた図である。

【図 16】図 16 は、本発明の第 2 実施形態の面発光レーザにおいて、活性層の偏光面の方位と  $c$  軸のなす角度と PL 発光強度の関係を計算と実験で求めた図である。

【図 17】図 17 は、本発明の第 2 実施形態の面発光レーザを示す断面図である。

【図 18】図 18 (a) は、面発光レーザと受光素子を有する本発明の第 2 実施形態の光装置を示す断面図、図 18 (b) は、その光装置の平面図である。

【図 19】図 19 (a) は、本発明の第 3 実施形態の端部発光型の発光ダイオードの原理的構成図、図 19 (b) は、本発明の第 3 実施形態の面発光型の発光ダイオードの原理的構成図である。

【図 20】図 20 (a) は、本発明の第 3 実施形態の端部発光型の発光ダイオードの層構造図、図 20 (b) は、その発光ダイオードをパッケージ化した構成を示す断面図である。

【図 21】図 21 (a) は、図 20 (a) で示した発光ダイオードにおける GaN 系化合物半導体のバンドダイヤグラム、図 21 (b) は、その発光ダイオードの光の放出方向からみた発光強度の偏光角分布を示す図である。

【図 22】図 22 (a) は、本発明の第 3 実施形態の面発光型の発光ダイオードの層構造図、図 22 (b) は、その発光ダイオードをパッケージ化した構成を示す断面図である。

【図 23】図 23 は、本発明の第 3 実施形態の表示装置に使用する発光ダイオードの偏向関係を示す平面構成図である。

【図 24】図 24 (a) は、従来の半導体ダイオードの第

1 例を示す断面図、図 24 (b) は、従来の半導体ダイオードの第 2 例を示す断面図である。

【図 25】図 25 (a)、(b) は、従来の半導体ダイオードの価電子帯のエネルギーバンド図である。

【図 26】図 26 は、従来の面発光型半導体レーザを示す斜視図である。

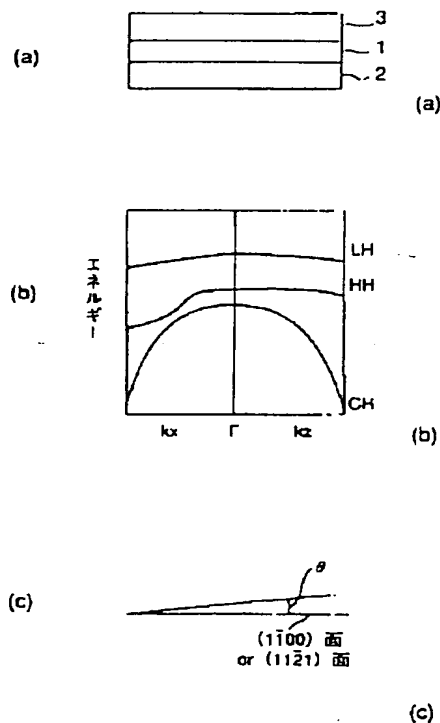
#### 【符号の説明】

- |                 |                                                                     |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1               | 第一の半導体                                                              |
| 2               | 第二の半導体                                                              |
| 10 3            | 第三の半導体                                                              |
| 1 1             | n 型 GaN (1-100) 基板                                                  |
| 1 2             | n 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層                  |
| 1 3             | n 型 GaN 光ガイド層                                                       |
| 1 4             | $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 活性層                        |
| 1 5             | p 型 GaN 光ガイド層                                                       |
| 1 6             | p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層                  |
| 1 7             | Ti/Au 電極                                                            |
| 1 8             | Ni/Au 電極                                                            |
| 2 1             | n 型 GaN (1-100) 基板                                                  |
| 2 2             | n 型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ クラッド層   |
| 2 3             | n 型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.2}\text{N}$ 光ガイド層 |
| 2 4             | $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 活性層                        |
| 2 5             | p 型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.2}\text{N}$ 光ガイド層 |
| 2 6             | p 型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.3}\text{N}$ クラッド層   |
| 2 7             | Ti/Au 電極                                                            |
| 2 8             | Ni/Au 電極                                                            |
| 3 1             | n 型 GaN (0001) 基板                                                   |
| 3 2             | (11-21) 小面                                                          |
| 3 3             | 絶縁膜                                                                 |
| 30 3 4          | (1-100) 劈開面                                                         |
| 4 1             | 基板                                                                  |
| 4 2             | 活性層                                                                 |
| 4 3             | DBR 鏡                                                               |
| 4 4             | c 軸                                                                 |
| 4 4 a           | z 偏光                                                                |
| 4 5             | x 偏光                                                                |
| 4 6             | y 偏光                                                                |
| 4 7, 4 8        | 障壁層                                                                 |
| 4 9, 5 1        | コンタクト層                                                              |
| 40 5 0 a, 5 0 b | 電極                                                                  |
| 5 2             | バッファ層                                                               |
| 5 3             | SiC 基板                                                              |
| 5 4             | AlN 高温バッファ層                                                         |
| 5 5             | ミラー層                                                                |
| 5 6             | n 型の障壁層                                                             |
| 5 7             | 下側光閉じ込め層                                                            |
| 5 8             | 活性層                                                                 |
| 5 9             | p 型の障壁層                                                             |
| 6 0             | 上側光閉じ込め層                                                            |
| 50 6 1          | 溝                                                                   |

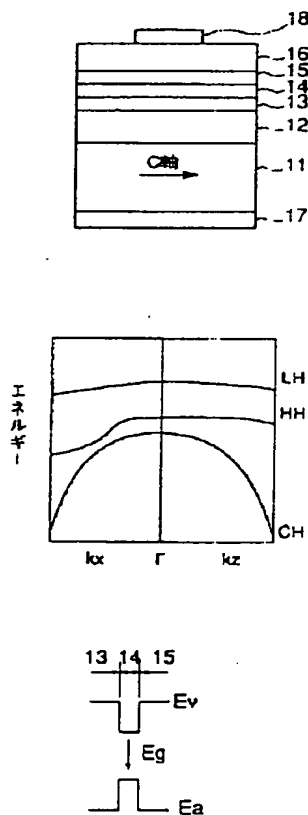
41

- 6 2 円柱部
- 6 3 フランジ部
- 6 4 光放出窓
- 6 5 n側電極
- 6 6 面発光半導体レーザ (発光素子)
- 6 7 フォトダイオード (受光素子)
- 6 8 電源
- 6 9 光量検出回路
- 7 0 発光ダイオード
- 7 1 サファイア基板
- 7 2 GaN パッファ層
- 7 3 n型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$  層
- 7 4  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  活性層
- 7 5 p型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$  層
- 7 6 Ni電極
- 7 7 Ti電極
- 7 8 発光ダイオード
- 7 9 ステム
- 8 0 絶縁体スペーサ

【図1】



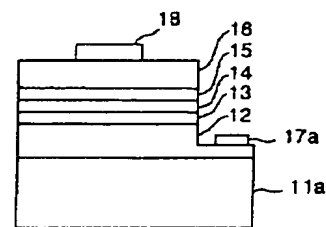
【図2】



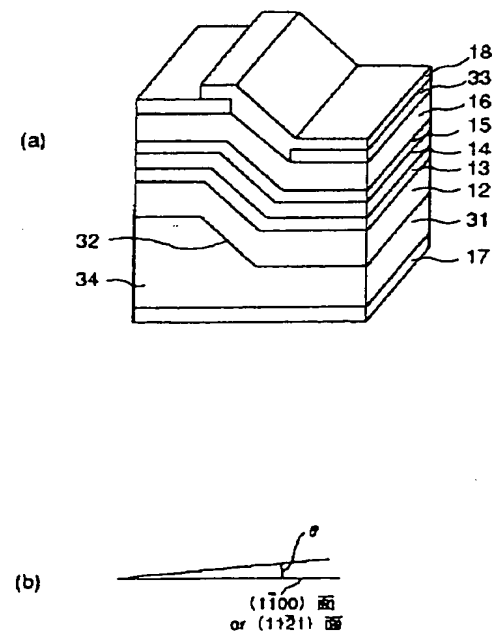
42

- 8 1 マイナス端子
- 8 2 プラス端子
- 8 3 モールド樹脂
- 8 4 発光ダイオード
- 8 5 ステム
- 8 6 マイナス端子
- 8 7 プラス端子
- 8 8 モールド樹脂
- 9 0 表示パネル
- 10 9 1 サファイア基板
- 9 2 GaN パッファ層
- 9 3 n型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$  層
- 9 4  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  活性層
- 9 5 p型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$  層
- 9 6 半透明電極
- 9 7 Ti電極
- 9 8 水平方向に偏光する発光ダイオード
- 9 9 垂直方向に偏光する発光ダイオード

【図3】



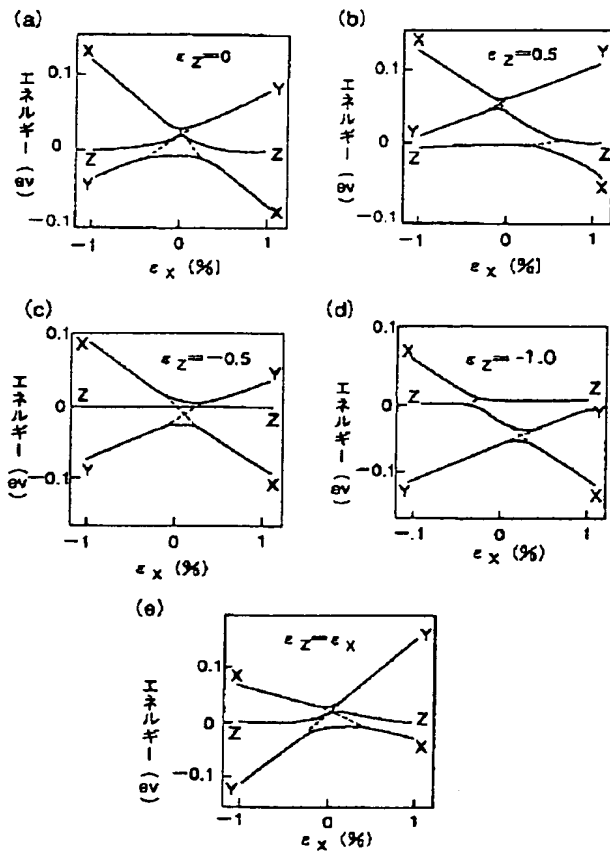
【図5】



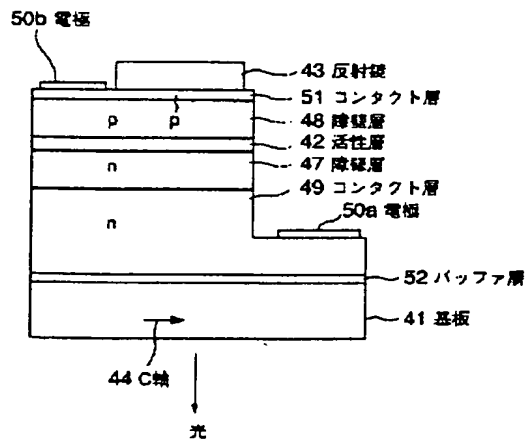




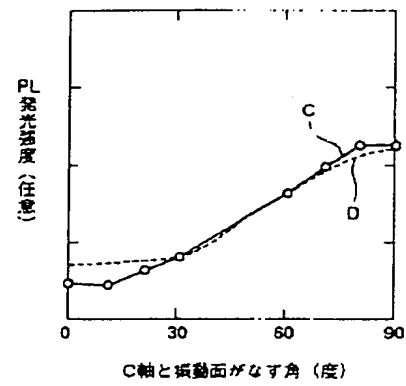
【図14】



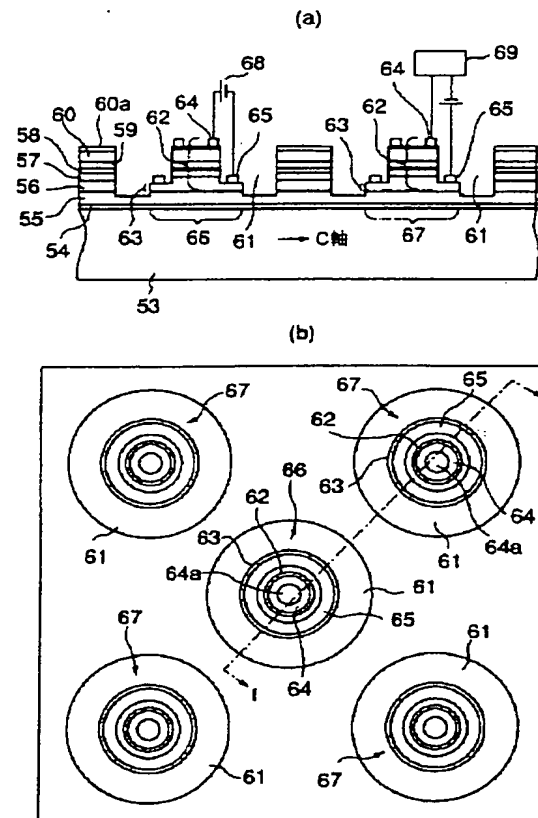
【図17】



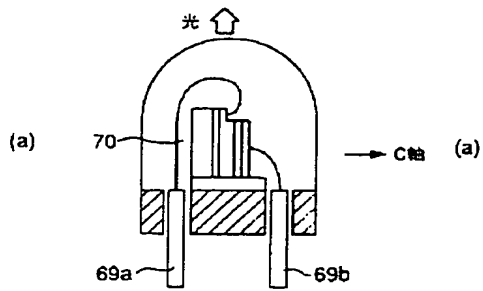
【図16】



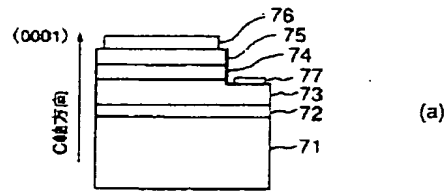
【図18】



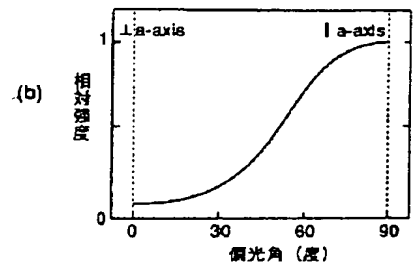
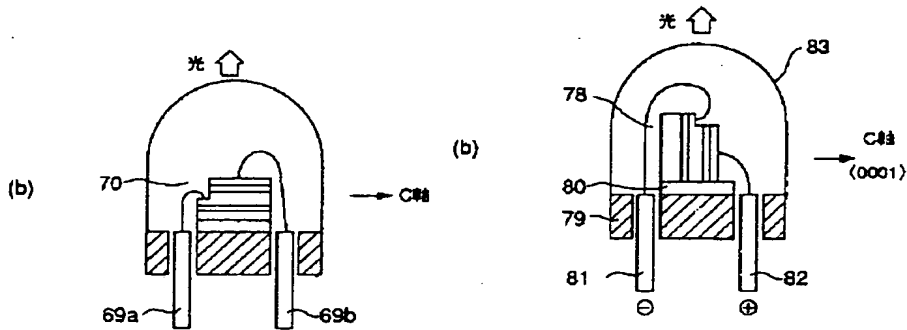
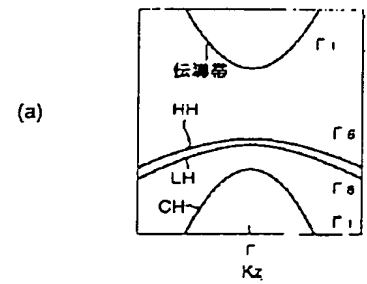
【図19】



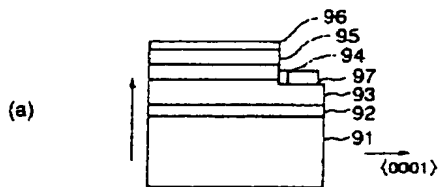
【図20】



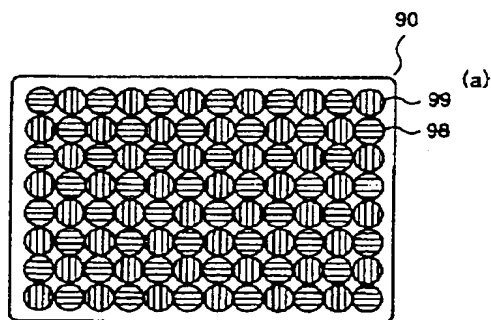
【図21】



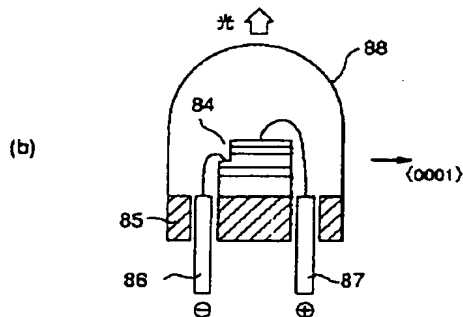
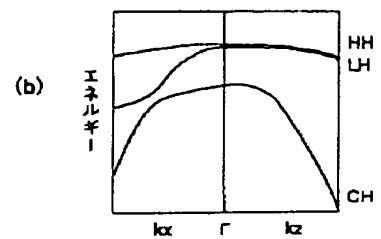
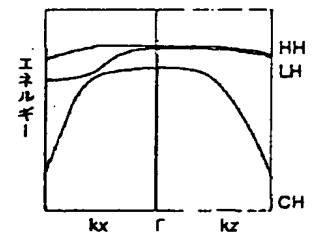
【図22】



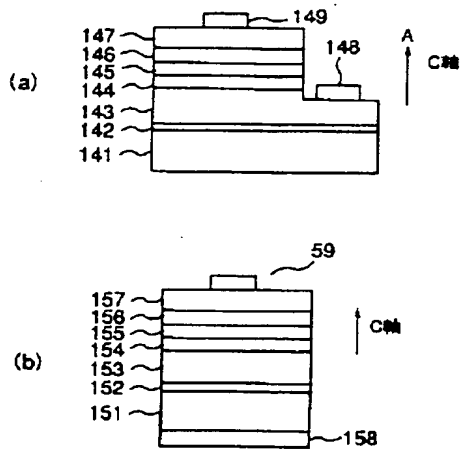
【図23】



【図25】



【図24】



【図26】

